

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**MAPEAMENTO DA BIOMASSA, CARBONO E VOLUME DE
MADEIRA EM CAATINGA SUBMETIDA A MANEJO FLORESTAL**

Brhenda Santos Lozado

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA - BRASIL
JULHO - 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**MAPEAMENTO DA BIOMASSA, CARBONO E VOLUME DE
MADEIRA EM CAATINGA SUBMETIDA A MANEJO FLORESTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Robson Borges de Lima

VITÓRIA DA CONQUISTA

BAHIA - BRASIL

JULHO – 2025

L959m

Lozado, Brhenda Santos.

Mapeamento da biomassa, carbono e volume de madeira em caatinga submetida a manejo florestal / Brhenda Santos Lozado, 2025.

85f. : il. color.

Orientador (a): Dr. Robson Borges de Lima.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais. Vitória da Conquista, 2025.

Inclui referência F. 73 – 85

1. Modelagem espacial. 2. *Random forest*. 3. Precipitação. I. Lima, Robson Borges de. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. III. T.

CDD: 634.92


BRHENDA SANTOS LOZADO

MAPEAMENTO DA BIOMASSA, CARBONO E VOLUME DE MADEIRA EM CAATINGA SUBMETIDA A MANEJO FLORESTAL


Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 05 de agosto de 2025.


Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ALESSANDRO DE PAULA
Data: 05/08/2025 17:48:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alessandro de Paula (D.SC., Ecologia e Recursos Naturais) - UESB

Documento assinado digitalmente
 EMANUEL ARAUJO SILVA
Data: 05/08/2025 16:22:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva (D.SC., Manejo Florestal) – UFISM/FW

Documento assinado digitalmente
 ROBSON BORGES DE LIMA
Data: 05/08/2025 21:41:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Robson Borges de Lima (D.SC., Mensuração Florestal) - UESB
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos, pelas conquistas, por nunca me desamparar, e também a Nossa Senhora por sempre interceder por mim, por me mostrar o caminho certo nos momentos de dúvida e desânimo.

Agradeço aos meus pais, Kelé e Edézia, por todo apoio e incentivo. Agradeço também aos meus irmãos, Brheno e Flávya, por todo companheirismo, por serem meu sustento nos momentos difíceis, por comemorarem todas as minhas conquistas e torcerem pelo meu sucesso.

Agradeço ao meu companheiro, amigo e namorado, Wellington, por tanto amor, paciência e carinho. Por todo suporte, por ouvir as minhas aflições, por sempre oferecer seu ombro amigo, por me incentivar e por acreditar no meu potencial. Sem você, a caminhada teria sido muito mais difícil.

Agradeço à minha cunhada e amiga, Maiane, por todas as conversas, risadas, conselhos e amizade. Agradeço também à minha Tia Fátima, por todas as orações, por todo carinho e cuidado.

Agradeço aos meus amigos, Eryca e Lucas, que percorreram junto comigo esse caminho árduo, mas que fizeram ser um caminho fluido, cheio de risadas e conselhos.

Agradeço a todos os familiares e amigos que torceram e vibraram por minhas conquistas. Em especial, Dandara, Júlia, Betânia e Alisson, por sempre estarem comigo. Vocês foram fundamentais nessa caminhada.

Agradeço ao meu orientador, prof.^o Dr. Robson Lima, pelos ensinamentos, apoio e compromisso.

Agradeço aos membros do laboratório *Forest Soils*, por todo acolhimento ao longo dos anos, em especial à Prof. Patrícia Barreto-Garcia e Paulo Monroe, por todo auxílio, suporte e ensinamentos.

Agradeço à Fapesb pelo apoio financeiro, o qual foi essencial para a realização desta pesquisa.

Por fim, agradeço à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia e a todo o corpo do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais por permitir a conclusão de uma nova etapa em minha carreira.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. HIPÓTESE CIENTÍFICA	11
1.2. Objetivo	11
1.2.1. Geral	11
1.2.2. Específicos	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1. DOMÍNIO FITOGEOGRÁFICO DA CAATINGA	12
2.2. Biomassa Florestal	14
2.3. Carbono	15
2.4. Volume de madeira.	17
2.5. Fatores Ambientais e seus Efeitos na Vegetação da Caatinga	18
2.5.1. Temperatura	19
2.5.2. Precipitação	20
2.5.3. Relevo	21
2.6. Modelagem Espacial Aplicada a Análise Ambiental da Caatinga	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1. Descrição da área de estudo	24
3.2. Base de dados	25
3.3. Obtenção da base de dados	26
3.4. Aquisição e pré-processamento de variáveis geoespaciais	27
3.5. Modelagem espacial	28
4. RESULTADOS	30
4.1. Modelagem espacial e fatores ambientais da biomassa.	30
4.2. Variação espacial da biomassa.	36
4.3. Modelagem espacial e fatores ambientais do volume de madeira.	39
4.4. Variação espacial do volume de madeira.	41
5. DISCUSSÃO	44
6. CONCLUSÃO	48
7. APÊNDICES	49
8. REFERÊNCIAS	64

RESUMO

LOZADO, Brhenda Santos, M. Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, julho de 2025. **Mapeamento da Biomassa, Carbono e Volume de Madeira em Caatinga submetida a Manejo Florestal.** Orientador: Robson Borges de Lima.

O domínio fitogeográfico da Caatinga apresenta elevada variabilidade ambiental e grande importância ecológica, embora ainda seja pouco estudado. Este trabalho teve como objetivo analisar a distribuição espacial da biomassa e do volume de madeira na Caatinga com base em variáveis ambientais, utilizando técnicas de modelagem estatística e sensoriamento remoto. Foram utilizadas parcelas de inventários florestais georreferenciadas e extraídas 27 covariáveis ambientais, incluindo variáveis bioclimáticas e topográficas. As informações foram processadas em ambiente SIG e utilizadas na modelagem por meio do aprendizado de máquinas, com o algoritmo *Random Forest* (RF), com validação cruzada para estimar e prever os estoques florestais em todo o domínio da Caatinga. Os resultados indicaram que fatores como precipitação, temperatura, evapotranspiração e relevo influenciam significativamente os padrões de biomassa e volume de madeira. Áreas com maior pluviosidade e altitudes moderadas apresentaram os maiores estoques de biomassa e volume de madeira, sendo encontrados ao norte da Caatinga. Os mapas produzidos contribuem para o planejamento de ações de manejo sustentável e conservação da vegetação nativa do semiárido.

Palavras-chave: Modelagem espacial; *Random Forest*; Precipitação.

Abstract

LOZADO, Brhenda Santos, M. Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, julho de 2025. **Mapping of biomass, carbon and wood volume in Caatinga under forest management.** Adviser: Robson Borges de Lima.

The Caatinga phytogeographic domain presents high environmental variability and great ecological importance, although it remains understudied. This study aimed to analyze the spatial distribution of biomass and wood volume in the Caatinga based on environmental variables, using statistical modeling techniques and remote sensing. Georeferenced forest inventory plots were used, from which 27 environmental covariates were extracted, including bioclimatic and topographic variables. The data were processed in a GIS environment and used in the modeling through machine learning, using the Random Forest (RF) algorithm with cross-validation to estimate and predict forest stocks throughout the Caatinga domain. The results indicated that factors such as precipitation, temperature, evapotranspiration, and topography significantly influence the spatial patterns of biomass and wood volume. Areas with higher rainfall and moderate altitudes—particularly in the northern Caatinga—presented the highest biomass and wood volume stocks. The generated maps contribute to the planning of sustainable forest management and conservation actions for native vegetation in the semi-arid region.

Keywords: Spatial modeling; Random Forest; Precipitation.

1. INTRODUÇÃO

Ecossistemas como - Chaco seco (América do Sul), o matorral mediterrâneo (Europa e Norte da África), o bushveld (sul da África) e os desertos da Península Arábica apresentam vegetação adaptada ao déficit hídrico, elevada radiação solar, sazonalidade climática marcada e solos rasos ou pedregosos, sendo semelhante com o domínio fitogeográfico da caatinga, apesar de sua singularidade florística e endemismo elevado (MAESTRE et al., 2012; ARCHER et al., 2017). A semelhança estrutural e funcional entre esses biomas torna possível o uso de ações comparativas, contribuindo para o entendimento das estratégias utilizadas pela vegetação para sua adaptação a esses cenários climáticos, dos padrões de resistência ecológica e da vulnerabilidade às mudanças climáticas (GRACE et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2021). Além disso, tais comparações contribuem para o desenvolvimento de práticas sustentáveis de manejo e conservação voltadas às zonas áridas e semiáridas globais (REYNOLDS et al., 2007; DEL CAMPO et al., 2019).

O domínio fitogeográfico da caatinga cobre praticamente todo o território dos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte, além de grande parte do sudoeste do Piauí, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, o interior da Bahia e o extremo norte de Minas Gerais (BERNARDES, 1999).

Embora seja de grande importância, especialmente para a região nordeste, estima-se que 89% da vegetação original já tenha sido alterada, afirmando que a Caatinga ainda é um dos biomas menos conhecidos e menos protegidos do Brasil, sofrendo intensos impactos causados por ações humanas (FAPESP, 2022).

Entre as alternativas para o uso racional dos recursos madeireiros da Caatinga está o Manejo Florestal Sustentável (MFS), prática que visa conciliar a exploração econômica dos recursos florestais com a conservação dos ecossistemas (CONAMA, 2024). No Brasil, o MFS em áreas de vegetação nativa é regulamentado pela Lei Federal nº 12.651/2012, que estabelece normas para a proteção da vegetação nativa (BRASIL, 2012). Esse manejo envolve um conjunto de intervenções realizadas na floresta com o objetivo de obter produtos e serviços sem comprometer sua capacidade produtiva e diversidade biológica (GARIGLIO et al., 2013).

O Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) destacou a intensificação do processo de mudança climática global, tornando precisa a busca por alternativas de adaptação que minimizem os

custos humanos e econômicos de desastres como secas, degradação do solo, desertificação, calor extremo e incêndios florestais. O aquecimento global tem aumentado a frequência e a intensidade desses eventos climáticos severos. Além disso, fenômenos em longo prazo, como o aumento das temperaturas médias, podem dificultar a vida das espécies em algumas regiões do planeta (BRASIL DE FATO, 2023).

As mudanças climáticas, apesar de sua natureza global, têm impactos variados em diferentes regiões do mundo. Na última década, regiões como o semiárido brasileiro têm enfrentado eventos climáticos mais extremos, como secas, que se tornaram mais intensas, frequentes e duradouras. Um exemplo disso é a maior seca do século, que ocorreu entre 2011 e 2017 nessa região (DA SILVA et al., 2018; PAREDES-TREJO, 2021).

Um outro ponto fundamental é o papel exercido pelas florestas no ciclo do carbono, seja no sequestro como no armazenamento do carbono atmosférico. Esses processos estão diretamente relacionados às espécies florestais, à sucessão ecológica e às práticas de manejo adotadas (WATZLAWICK et al., 2011; SOUZA et al., 2012). Diante disso, torna-se essencial avaliar o estoque de biomassa por meio de variáveis de fácil mensuração, que permitam compreender a dinâmica do carbono ao longo do crescimento dos indivíduos arbóreos (SANQUETTA et al., 2003).

A mensuração da biomassa tem ganhado relevância nos inventários florestais, tanto para fins de exploração comercial da madeira quanto para estimativas ligadas ao ciclo global do carbono. Isso porque, geralmente, se assume que 45% da biomassa seca acima do solo corresponde ao carbono estocado (SILVA et al., 2022). Métodos de mapeamento e estimativa que ofereçam informações confiáveis a baixo custo tornam-se fundamentais para o monitoramento e gestão florestal.

Nesse sentido, a modelagem geoestatística surge como uma ferramenta promissora, capaz de prever variáveis em locais não amostrados e gerar mapas de distribuição espacial a partir de dados coletados em campo (CAMARGO, 1998). A aplicação desses modelos tem se mostrado eficaz em estudos de estimativa de volume de madeira na Caatinga (ROCHA, 2023). Além disso, as informações geradas, são essenciais para subsidiar políticas públicas ambientais, como a criação de unidades de conservação, definição de corredores ecológicos e valorização de mecanismos de mercado como os créditos de carbono (BARNI et al., 2016; SILVEIRA et al., 2019).

Sendo assim, a biomassa, o carbono e o volume de madeira são elementos interdependentes e essenciais para a avaliação da saúde das florestas e do bem-estar do planeta. A preservação e gestão sustentável desses recursos são fundamentais para o enfrentamento das mudanças climáticas, a proteção da biodiversidade e a garantia de recursos naturais para as gerações futuras. Promover práticas de manejo florestal que respeitem e valorizem esses componentes é vital para a manutenção dos serviços ecossistêmicos prestados pelas florestas brasileiras, especialmente no domínio fitogeográfico da Caatinga.

1.1 HIPÓTESE CIENTÍFICA

As variáveis ambientais influenciam o acúmulo dos estoques de biomassa, carbono e volume de madeira em vegetação de Caatinga.

1.2 OBJETIVOS

1.1.1. Geral

O presente estudo tem como objetivo realizar o mapeamento preditivo da biomassa, carbono e volume de madeira de espécies arbóreas em razão das variáveis ambientais no domínio fitogeográfico da Caatinga.

1.2.2. Específicos

- a) Desenvolver modelos estatísticos para predição espacial dos estoques de biomassa, carbono e volume de madeira na escala do domínio fitogeográfico da Caatinga;
- b) Identificar os principais fatores ambientais que influenciam a variação da biomassa, carbono e volume de madeira ao longo do domínio fitogeográfico da Caatinga;
- c) Gerar mapas preditivos da distribuição potencial dos estoques de biomassa, carbono e volume como subsídio para gestão sustentável para vegetação de Caatinga.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Domínio fitogeográfico da Caatinga

A Caatinga é o bioma mais importante da região nordeste, ocupando uma área de 862.818 quilômetros quadrados, abrangendo 70% da região nordeste e 10,1% do território nacional (IBGE, 2019a). Sua distribuição na região nordeste se dá em quase todos os estados, exceto o Maranhão e em estados da região sudeste, e ocupa também uma pequena parte do estado de Minas Gerais (MMA, 2022).

As espécies lenhosas, em especial, presentes nesse bioma, desempenham papel crucial no equilíbrio ecológico da região. Além de funcionarem como sumidouros de carbono, contribuem para a manutenção do microclima, estabilidade do solo e conservação da biodiversidade local (DEL CAMPO et al., 2019; MARANGON et al., 2016).

A Caatinga é reconhecida como um dos ambientes semiáridos mais povoados do mundo (REDO et al., 2013), o que acaba prejudicando a flora, a fauna e a fertilidade dos solos, por causa da elevada degradação, alto grau de antropização e centros de desertificação (RAMOS et al., 2020). Ainda assim, muitos pesquisadores preferem concentrar suas pesquisas em florestas úmidas e densas, fazendo com que a Caatinga apresente uma menor quantidade de estudos na área científica, especialmente quando comparada a biomas como Amazônia e Mata Atlântica (GANEM et al., 2020b; LEAL et al., 2005). Essa diferença de atenção científica compromete os esforços de conservação, especialmente em um contexto de intensas pressões antrópicas e mudanças climáticas.

A região enfrenta acentuada degradação ambiental, decorrente principalmente do desmatamento para utilização de lenha para diversos fins como energia, carvão, cercas (estacas e mourões), além da substituição por monoculturas, pastagens e práticas agrícolas e pecuárias (SILVA et al., 2020; ARAÚJO et al., 2022). Estudos mostram que 33% da cobertura vegetal original já foi convertida para outros usos, resultando em fragmentação do habitat e perda significativa de biodiversidade (MAPBIOMAS, 2024).

Além disso, a vulnerabilidade socioeconômica das populações locais contribui para a exploração insustentável dos recursos naturais, intensificando processos de desertificação e perda de solo fértil (LIMA et al., 2020). Mesmo com o reconhecimento

legal da importância do bioma, apenas cerca de 5% de sua área está protegida por unidades de conservação (ICMBIO, 2023), o que ressalta a urgência de estratégias de monitoramento e manejo mais eficazes.

O monitoramento remoto e a modelagem ambiental surgem como ferramentas essenciais para suprir a carência de dados e fornecer subsídios para políticas públicas e ações de conservação adaptadas às especificidades ecológicas da Caatinga (MORA et al., 2021; MORAIS et al., 2018).

A vegetação presente nesse bioma é composta predominantemente por formações xerófitas, decíduas, arbustivas e lenhosas, sendo do tipo floresta arbóreo-arbustiva, com influência da sazonalidade pluviométrica e períodos de seca na maior parte do ano, adaptadas à escassez hídrica por meio de estratégias morfológicas e fisiológicas específicas, como a queda das folhas na estação seca e a presença de estruturas de reserva de água (FERNANDES E QUEIROZ, 2018; SOUZA et al., 2015; SILVA et al., 2023).

O principal tipo de vegetação presente na área é a Savana-Estépica (63,30%), seguida da Floresta Estacional Decidual (8,32%) Floresta Estacional Semidecidual (2,13%), Savanas (1,61%) e pequenas áreas ocupadas por Florestas Ombrófilas (0,4%) (IBGE, 2019b). Essa diversidade estrutural está relacionada à heterogeneidade do relevo, solo e regime hídrico, resultando em mosaicos vegetacionais ao longo do bioma (NUNES, 2022).

Com uma flora estimada em mais de 4.900 espécies, sendo cerca de 30% endêmicas, a Caatinga é um importante centro de diversidade biológica (FLORA DO BRASIL, 2023). No entanto, deste total, tem-se o conhecimento apenas de 827 espécies do estado de conservação (17% do total de espécies que se encontram no bioma) e 481 do total encontram-se sob alguma categoria de ameaça de extinção, em função da perda de habitat e da exploração excessiva de recursos naturais, fazendo com que a Caatinga seja o terceiro bioma no ranking de espécies ameaçadas, ficando atrás somente da Mata Atlântica e do Cerrado (MMA, 2022; IBGE, 2023).

A pressão histórica sobre os recursos naturais da Caatinga, associada ao uso predatório e à ausência de políticas eficazes de recuperação ambiental, compromete o funcionamento ecológico do bioma e sua resiliência em face das mudanças climáticas. Por esse motivo, torna-se ainda mais essencial ampliar a coleta de dados atualizados e mais precisos na Caatinga por meio do sensoriamento remoto, a fim de

obter informações sobre o estado de conservação da vegetação (GANEM et al., 2020b).

2.2. Biomassa Florestal

A biomassa florestal corresponde ao total de matéria orgânica de origem vegetal presente em um ecossistema florestal, sendo composta por componentes vivos (troncos, galhos, folhas, raízes) e mortos (serapilheira e madeira morta) (IPCC, 2019). No contexto da Caatinga, a quantificação da biomassa é particularmente relevante devido à sua importância ecológica, energética e ao seu papel no sequestro de carbono (DE SÁ et al., 2024).

A biomassa é amplamente considerada uma fonte de energia renovável, especialmente a biomassa lenhosa, devido à sua capacidade de regeneração e potencial para substituição de combustíveis fósseis (DEL CAMPO et al., 2019). No entanto, a produtividade da biomassa na Caatinga é altamente variável, influenciada por fatores como precipitação sazonal, temperatura, tipo de solo, relevo, pressão antrópica e diversidade florística (ALVES et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2023).

A composição nutricional da biomassa também varia entre os compartimentos das plantas. Estudo de Costa et al. (2014) mostrou que, embora as folhas acumulem maior quantidade de nutrientes como nitrogênio (N) e cálcio (Ca), o fuste pode armazenar quantidades significativas desses elementos, dependendo da espécie, das condições ambientais e da região. Tais variações são relevantes para o entendimento dos processos de ciclagem de nutrientes e manejo sustentável da vegetação nativa.

Os estudos sobre biomassa florestal têm uma ampla gama de objetivos, seja para fins energéticos, econômicos, na avaliação de crescimento de florestas, quantificar a ciclagem de nutrientes, avaliar impactos e fundamentar estudos de sequestro de carbono (AZEVEDO et al., 2018; PINTO et al., 2012; ELOY, 2022).

A quantificação da biomassa florestal pode ser determinada basicamente por dois métodos, o direto e o indireto. Pelo método direto, também conhecido como destrutivo, as determinações são feitas pela medição real diretamente na floresta, implicando o corte e medição da massa de todos os compartimentos das árvores, sendo um processo mais demorado, oneroso, difícil e envolve técnica destrutiva. O método indireto, conhecido como não destrutivo, consiste no emprego de equações alométricas, que relacionam a variável biomassa com variáveis comumente medidas

em campo nos trabalhos de inventário florestal (SANQUETTA et al., 2014). Para Schikowski et al. (2013), o método direto que consiste na pesagem de todo o material, é o mais confiável.

Estudos recentes têm empregado técnicas de sensoriamento remoto e modelos integrados com dados de campo para aprimorar as estimativas de biomassa na Caatinga, contribuindo para maior rigor e eficiência na avaliação dos estoques florestais (NUNES et al., 2022; SILVA et al., 2023). Além disso, a quantificação da biomassa é fundamental para estimar o carbono estocado e projetos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) voltados para ecossistemas semiáridos.

Por fim, entender a dinâmica da biomassa florestal na Caatinga é essencial para o planejamento de estratégias de conservação, manejo florestal sustentável e adaptação às mudanças climáticas, considerando-se a fragilidade ecológica, a importância social e econômica do bioma.

2.3. Carbono

Os estoques de carbono em ecossistemas terrestres representam um dos principais componentes do ciclo global do carbono, contribuindo significativamente para a regulação climática e a mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2021). Na vegetação da Caatinga, o carbono é acumulado tanto na biomassa aérea (troncos, galhos, folhas) quanto na subterrânea (raízes), além do carbono orgânico do solo (COS), que representa uma fração relevante e frequentemente subestimada (SILVA et al., 2022).

Segundo Silva et al., 2022, as florestas tropicais sazonalmente secas (SDTFs), como a Caatinga, podem armazenar até 45% do carbono presente nas florestas tropicais, mesmo com menor densidade e volume de madeira por hectare.

Além disso, o carbono desempenha um papel crucial no controle da temperatura global por meio do efeito estufa. Quando o solo é manejado de forma adequada, evitando perdas de matéria orgânica, as emissões desses gases podem reduzir (MACHADO, 2005). A concentração de CO₂ na atmosfera afeta diretamente o aquecimento global, e estudos da troca de energia nos ecossistemas fornecem informações importantes para a compreensão dos fluxos de CO₂ nos sistemas ambientais (GIONGO et al., 2011).

O carbono na Caatinga é fortemente influenciado pelas características fenológicas das espécies, que apresentam estratégias adaptativas para tolerar o

estresse hídrico, como caducifólia e baixo crescimento (YU et al., 2018). Essas adaptações afetam diretamente o acúmulo e a liberação de carbono ao longo do tempo, tornando a dinâmica do carbono nesse bioma altamente sazonal. Compreender a fenologia da vegetação é essencial para analisar as tendências nos ciclos de carbono, água e energia, sendo crucial para avaliar as respostas dos ecossistemas (ZHENG et al., 2018).

A Caatinga apresenta plantas mais espaçadas e com menor porte, quando comparada a outros biomas brasileiros. Portanto, é esperado que se observe menor volume de madeira e, conseqüentemente, menos biomassa e carbono estocado por unidade de área (SANTOS et al., 2021). Observa-se que a maioria das pesquisas sobre estoques de carbono foca nos trópicos úmidos, enquanto as florestas tropicais sazonalmente secas (SDTFs) recebem menos atenção científica (SCHULZ et al., 2018). O armazenamento de carbono nas SDTFs mostra que esses ecossistemas semiáridos respondem aos principais fatores ambientais influenciados pelos cenários globais. É necessário entender melhor as mudanças de uso e ocupação da terra para compreender a dinâmica desses ecossistemas em longo prazo (CORONA-NÚÑEZ; CAMPOS; WILLIAMS, 2018).

A maior parte do carbono está concentrada no fuste das árvores, seguido pelas raízes e pela serapilheira (LIMEIRA et al., 2020). O solo, por sua vez, atua como reservatório de carbono em longo prazo, cuja estabilidade depende do tipo de uso e manejo. Práticas inadequadas, como o desmatamento, o sobrepastoreio e as queimadas recorrentes, promovem a degradação da cobertura vegetal e a liberação de carbono previamente estocado no solo (CORONA-NÚÑEZ; CAMPOS; WILLIAMS, 2018).

Além disso, a quantificação precisa dos estoques de carbono é fundamental para iniciativas como o REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal), bem como para a formulação de políticas públicas voltadas à conservação da vegetação nativa (DEL CAMPO et al., 2019). Métodos modernos de monitoramento, incluindo LIDAR, imagens de satélite e sensores hiperespectrais, vêm sendo utilizados para mapear e estimar os estoques de carbono de forma não destrutiva e em maior escala (SAATCHI et al., 2011).

2.4. Volume de madeira

O volume de madeira é uma variável fundamental na mensuração de estoques florestais, estando diretamente relacionada à produtividade, ao potencial de uso econômico e à capacidade de estocagem de carbono da vegetação (BATISTA et al., 2014). No bioma Caatinga, caracterizado por vegetação arbustivo-arbórea de pequeno porte e distribuição irregular, a estimativa do volume de madeira apresenta desafios específicos em razão da heterogeneidade estrutural e das intensas pressões antrópicas (SILVA et al., 2023).

As florestas secas tropicais, como a Caatinga, possuem em geral menor densidade de indivíduos e menor altura média das árvores, o que se traduz em menores volumes por hectare em comparação com biomas mais úmidos, como a Amazônia ou a Mata Atlântica. Ainda assim, o volume de madeira na Caatinga pode variar amplamente, com valores médios entre 20 e 60 m³/ha, dependendo do estado de conservação, tipo de solo, relevo e histórico de uso da área (SILVA et al., 2021).

A estimativa do volume de madeira é geralmente realizada com base em equações volumétricas aplicadas a variáveis mensuráveis em campo, como o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total ou comercial das árvores. Os métodos clássicos de cubagem, como os de Smalian, Huber e Newton, continuam sendo amplamente utilizados, sendo a cubagem rigorosa ainda considerada a técnica mais precisa, apesar de ser mais trabalhosa (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

Com os avanços tecnológicos, novos métodos vêm sendo incorporados, como o uso do LiDAR terrestre, fotogrametria com drones, modelagem espacial por regressão geográfica ponderada e krigagem, aumentando a exatidão e a capacidade de prever o volume em grandes extensões (SANTOS et al., 2021; SAATCHI et al., 2011).

A estimativa do volume também desempenha papel essencial em inventários florestais, planos de manejo e avaliações da dinâmica sucessional. É uma variável-chave para o cálculo da biomassa e, conseqüentemente, dos estoques de carbono, sendo fundamental para estudos de compensação ambiental, reflorestamento e avaliação do potencial madeireiro de áreas nativas ou restauradas (PINTO et al., 2012).

2.5. Fatores ambientais e seus efeitos na vegetação da Caatinga

Devido ao domínio fitogeográfico da caatinga apresentar extensas áreas, acredita-se que ele exerce um papel fundamental nos processos ecológicos regionais e globais, especialmente nas interações entre a biosfera e a atmosfera (MOURA et al., 2016; FUNDAJ, 2021). Sua vegetação arbóreo-arbustiva, amplamente predominante, é altamente adaptada às condições ambientais do semiárido e contribui de forma significativa para a estabilidade do balanço hidrológico, a conservação do solo e a proteção dos recursos hídricos (GANEM et al., 2020a; ISPN, 2023).

As adaptações das espécies da Caatinga resultam de longos processos evolutivos, influenciados por fatores bióticos e abióticos. Essas adaptações envolvem estratégias, como vegetação caducifólia, presença de espinhos, armazenamento hídrico nos caules e sistemas radiculares profundos, permitindo que as plantas enfrentem condições extremas de seca e alta radiação solar (KRAFT et al., 2015; ISPN, 2023).

As mudanças climáticas têm causado alterações na fenologia das espécies lenhosas da Caatinga, resultando em reduções na produtividade primária, no crescimento vegetativo e na taxa de regeneração natural (LIMA, 2025). Essas mudanças afetam diretamente o acúmulo de biomassa, sobretudo em áreas sujeitas à degradação ou em estágios iniciais de sucessão ecológica. Como consequência, há uma redução na capacidade de fixação de carbono atmosférico, o que compromete o papel da vegetação como sumidouro de CO₂ (DE OLIVEIRA et al., 2006).

Além disso, o volume de madeira disponível é afetado pela mortalidade precoce de árvores e pela substituição de espécies arbóreas por arbustivas ou herbáceas mais tolerantes à seca, mas com menor capacidade de armazenamento de carbono e menor valor comercial (LUCENA et al., 2021). A perda de cobertura vegetal, associada ao uso inadequado do solo e ao avanço das mudanças climáticas, acarreta uma redução significativa na densidade e no porte das espécies, diminuindo o volume de madeira por hectare e comprometendo o potencial produtivo da floresta nativa (DA SILVA et al., 2018).

A biomassa aérea viva (composta principalmente pelo fuste, galhos e folhas) representa uma das principais frações de carbono nos ecossistemas terrestres. No entanto, em regiões da Caatinga sujeitas a distúrbios climáticos extremos, como ondas de calor e estiagens prolongadas, observa-se uma redução na densidade da vegetação e, conseqüentemente, nos estoques de biomassa e carbono (MARENGO

et al., 2018; IPCC, 2021). Essa dinâmica ameaça diretamente os serviços ecossistêmicos associados à floresta, como regulação climática, proteção do solo e conservação da biodiversidade.

O monitoramento das condições ambientais é essencial para compreender como diferentes grupos vegetais respondem às alterações do clima. Com o aumento das temperaturas, intensificação da evapotranspiração e diminuição da precipitação, observa-se uma série de impactos negativos, como desequilíbrios no ciclo hidrológico, degradação dos solos, déficit no crescimento vegetal, alterações nos bancos de sementes e, conseqüentemente, mudanças na composição florística e na expressão fenotípica das espécies (GANEM et al., 2020a; SANTOS et al., 2020; PESCADOR et al., 2015).

Projeções indicam que, até 2060, cerca de 40% da biodiversidade da Caatinga poderá ser afetada pelas mudanças climáticas, especialmente em regiões mais vulneráveis (GALILEU, 2023). Portanto, torna-se fundamental estudar os fatores ambientais, isoladamente e em conjunto, para compreender como eles modificam o ambiente como um todo e para desenvolver estratégias de conservação e manejo sustentáveis em face das transformações climáticas em curso.

2.5.1. Temperatura

A Caatinga, situada em região tropical entre o Trópico de Capricórnio e o Equador, está sujeita a elevados níveis de radiação solar durante praticamente todo o ano, o que contribui para o regime climático tipicamente semiárido predominante em sua extensão. Nessa condição, observam-se temperaturas médias anuais elevadas, variando entre 25 °C e 30 °C, associadas a baixos índices pluviométricos, com precipitações que oscilam entre 400 mm e 1.200 mm por ano. Esse contexto climático exerce forte influência sobre os processos ecológicos do bioma, condicionando a composição da vegetação, a dinâmica hidrológica e os padrões de adaptação das espécies à escassez hídrica (TABARELLI et al., 2018; GOMES et al., 2017; MORO et al., 2016).

A temperatura elevada é um dos principais fatores ambientais que afetam a distribuição de espécies, pois interfere diretamente nas taxas metabólicas, processos fisiológicos das plantas e duração do ciclo de crescimento (MAHARJAN et al., 2022). Além disso, a elevação da temperatura média do ar, a intensificação do déficit hídrico e a redução da duração das estações chuvosas têm modificado significativamente os

padrões ecológicos desse bioma, impactando diretamente os estoques de biomassa, o volume de madeira e o sequestro de carbono (ALMEIDA et al., 2020; MEDEIROS et al., 2023).

A cobertura vegetal exerce papel fundamental na regulação da temperatura do solo, promovendo estabilidade térmica e maior retenção de umidade. Em áreas com vegetação preservada, como a Caatinga conservada, observa-se menor variação térmica e maior sequestro de carbono, principalmente durante o período chuvoso, devido à recomposição foliar das espécies xerófitas (GOMES et al., 2021b). Em contraste, áreas degradadas apresentam maior amplitude térmica e menor umidade relativa do ar, intensificando os efeitos da radiação solar e da evaporação, o que acarreta perda de carbono no solo e aumento da atividade microbiana (SILVA et al., 2020).

Essas variações microclimáticas provocadas pela cobertura vegetal e pelo uso da terra mostram que, mesmo em ambientes com vegetação caducifólia como a Caatinga, a presença de serapilheira e o sombreamento natural influenciam a conservação da umidade e a redução da temperatura da superfície do solo (SILVA et al., 2020).

2.5.2. Precipitação

A Caatinga apresenta uma elevada variabilidade sazonal e interanual da precipitação, o que influencia diretamente os processos hidrológicos, a fenologia da vegetação e a dinâmica do carbono (MARENGO et al., 2017). A umidade do solo no semiárido nordestino, dependente fortemente das chuvas, sendo a principal variável que regula os fluxos de evapotranspiração na região. Em um experimento em longo prazo conduzido em São João, Pernambuco, verificou-se que os menores níveis de umidade do solo ocorrem entre setembro e fevereiro, enquanto os maiores valores são registrados entre março e agosto, refletindo o padrão pluviométrico regional (SOUZA et al., 2023).

Apesar da curta duração da estação chuvosa, geralmente restrita a três ou quatro meses do ano, os eventos de precipitação podem ser intensos, com mais de 70% da chuva anual concentrada entre janeiro e maio (ANDRADE et al., 2020). No entanto, mesmo durante os períodos úmidos, grande parte da água precipitada é perdida por transpiração, devido à baixa capacidade de retenção hídrica dos solos rasos e pedregosos característicos da Caatinga (GANEM, 2017). Além disso, a

evapotranspiração potencial pode ultrapassar três vezes o volume de precipitação anual, gerando um severo déficit hídrico (GOMES et al., 2017; INMET, 2020).

Essa dinâmica climática influencia diretamente a produtividade vegetal e o sequestro de carbono. Durante os meses mais chuvosos, as plantas reconstituem rapidamente sua copa foliar, aumentando a taxa fotossintética e, conseqüentemente, a absorção de dióxido de carbono da atmosfera. Em áreas bem conservadas, esse processo transforma a Caatinga em um sumidouro de carbono, com valores estimados de remoção de até 5,2 toneladas de carbono por hectare ao ano (HOLANDA et al., 2017; EMBRAPA, 2023). No entanto, em anos de estiagem prolongada, o sistema pode operar como fonte de carbono, liberando mais CO₂ do que consegue fixar (DA SILVA GOMES et al., 2021).

2.5.3. Relevo

O relevo exerce papel determinante na configuração ecológica e funcional da Caatinga, afetando diretamente a composição dos solos, a distribuição das espécies vegetais e a dinâmica hidrológica. No semiárido brasileiro, a heterogeneidade topográfica, expressa por variações em altitude, declividade e rugosidade, influencia o sombreamento, a drenagem e o microclima, moldando, assim, os padrões de diversidade e estrutura da vegetação (NAZAR e RODRIGUES, 2019; MAHARJAN et al., 2022). Áreas com maior declividade apresentam restrições para o enraizamento de espécies, além de favorecer o escoamento superficial, limitando a infiltração da água e, por conseguinte, afetando negativamente a disponibilidade hídrica (GUERRA et al., 2014; MAHARJAN et al., 2022).

A variabilidade latitudinal também altera significativamente as propriedades físicas e químicas dos solos. Por exemplo, os gradientes de altitude atuam como filtros ambientais naturais, propiciando condições edafoclimáticas únicas que favorecem comunidades vegetais específicas e processos pedogenéticos distintos. Em regiões de topo, como o maciço do Pico do Jabre na Paraíba, prevalecem Neossolos Litólicos com baixos teores de matéria orgânica e elevada pedregosidade, resultantes da baixa profundidade do solo e do intenso escoamento superficial. Já nas encostas e sopés, a ação do intemperismo e da deposição coluvial favorece a formação de Cambissolos e Argissolos mais evoluídos, com maior profundidade, teor de argila e desenvolvimento de horizontes diagnósticos (SOUSA et al., 2025).

Além disso, a rugosidade do terreno influencia o lençol freático e a formação de microbacias, promovendo variações na umidade do solo e na retenção de nutrientes, que constituem fatores essenciais para o crescimento arbóreo e o acúmulo de biomassa (LOURENÇO RODRIGUES et al., 2016). Em áreas com drenagem mais eficiente e solos mais profundos, observa-se um maior estoque de carbono e volume de madeira, o que destaca a relação intrínseca entre relevo, vegetação e serviços ecossistêmicos associados, como o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade (DE LIMA MARQUES et al., 2021).

Além das variáveis topográficas já mencionadas, Syfert et al. (2018) observaram que há uma tendência de diminuição na diversidade de espécies vegetais à medida que a altitude aumenta.

2.6. Modelagem Espacial Aplicada à Análise Ambiental da Caatinga

A modelagem espacial tem se consolidado como uma ferramenta indispensável para o entendimento das dinâmicas ambientais da Caatinga, especialmente diante dos desafios impostos pela variabilidade ecológica, climática e antrópica desse bioma. O avanço de tecnologias, como sistemas de informações geográficas (SIG), sensoriamento remoto e algoritmos de aprendizado de máquina, possibilita integrar variáveis ambientais e espaciais em modelos que ampliam a precisão e a aplicabilidade de estudos ecológicos, de conservação e de uso sustentável da terra (SILVEIRA et al., 2023; FARIAS et al., 2023).

Nas regiões de florestas secas, como a Caatinga, a vegetação apresenta alta variabilidade espaço-temporal, resultado da interação entre fatores ecológicos naturais e práticas de uso do solo, o que dificulta o monitoramento de processos como regeneração, reflorestamento e desmatamento (GANEM et al., 2020b; MAYES et al., 2015). Essa heterogeneidade é ainda ampliada pela distribuição fragmentada de arbustos, árvores e pastagens, que altera a resposta espectral da vegetação e requer análises mais robustas com maior nível de detalhamento e acurácia (TOMASELLA et al., 2018).

Estudos como de Souza et al. (2024) e Silveira et al. (2023) demonstraram a eficácia da modelagem espacial para mapear atributos ecológicos e identificar

padrões de mudança ambiental. Foram aplicados modelos baseados em florestas aleatórias e dados do PronaSolos e Landsat para estimar espacialmente os teores de carbono orgânico, nitrogênio e fósforo no solo da Caatinga, revelando forte influência da topografia e da cobertura vegetal na fertilidade do solo. Já no segundo estudo utilizaram krigagem de regressão para estimar o volume de madeira com base em variáveis ambientais como altitude, temperatura média anual e precipitação, demonstrando a aplicabilidade dessas técnicas na quantificação de recursos florestais.

O uso do sensoriamento remoto, aliado à modelagem espacial, permite monitorar de forma contínua alterações na cobertura do solo, condições de seca severa e variações fenológicas ao longo do tempo (SIDHU et al., 2018; QI et al., 2020; LAI et al., 2020). Dados obtidos por sensores orbitais como o Landsat, com resolução espacial média e o MODIS, com maior resolução temporal, têm sido amplamente utilizados para gerar modelos preditivos da dinâmica ambiental, subsidiando políticas públicas e estratégias de mitigação dos impactos climáticos (ALVARADO et al., 2018; MAPBIOMAS, 2020).

A série histórica de imagens do projeto MapBiomass, baseada em dados Landsat de 1985 a 2018 e processada com o algoritmo *Random Forest*, tem sido fundamental para detectar mudanças significativas na cobertura vegetal da Caatinga, como o avanço do desmatamento, os efeitos do uso do fogo e o impacto das atividades agropecuárias (CHEN et al., 2017; SLINGSBY et al., 2020). Além disso, técnicas de espectroscopia e índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Aprimorado (EVI), têm sido empregados para avaliar o vigor da vegetação, com base nas características de absorção, transmissão e reflexão da radiação solar pelas folhas (HERRMANN, 2022; GUERINI FILHO et al., 2020).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área de estudo

A metodologia adotada neste trabalho foi adaptada com base nos procedimentos descritos por Pereira et al. (2024).

Este trabalho foi realizado no bioma caatinga que compreende 18,2% do território brasileiro, ocupando 862.818 km². Neste habitam cerca de 27 milhões de pessoas (IBGE, 2019a). A Caatinga abrange os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais (Fig 1).

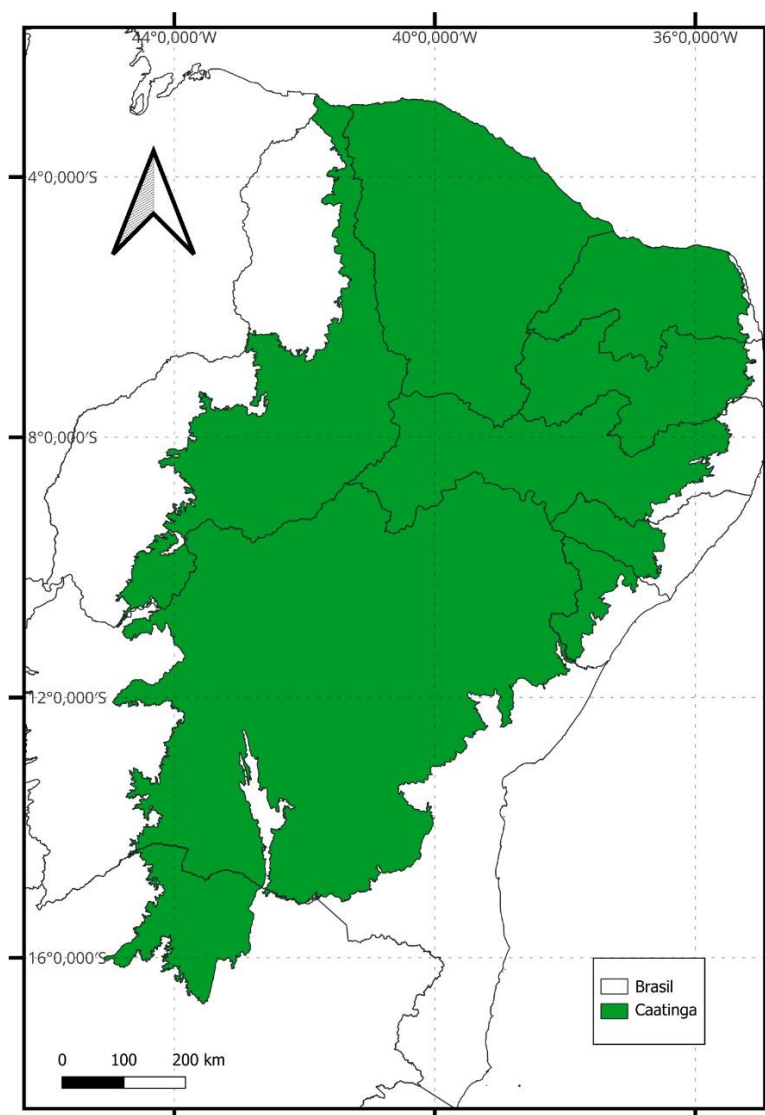


Figura 1 - Área compreendida pelo domínio fitogeográfico da Caatinga, localizada no Nordeste brasileiro.

A região apresenta clima semiárido quente (BSwh), conforme a classificação de Köppen, com temperaturas médias elevadas entre 25 °C e 30 °C. As chuvas são escassas, mal distribuídas ao longo do ano e concentradas em um curto período, geralmente entre três meses. A precipitação anual varia de 400 a 1.200 mm, e os longos períodos de estiagem são uma característica marcante do regime climático local (LUCENA e STEINKE, 2015; SILVA et al., 2017; TABARELLI et al., 2018; SUDENE, 2021).

Os solos presentes nas regiões semiáridas apresentam uma alta salinidade, ocasionada pela baixa precipitação e alta taxa de evaporação, sendo também solos rasos e pedregosos, com predominância dos tipos de solos Argissolos, Latossolos e Luvissolos (EMBRAPA, 2021).

A vegetação é classificada como Savana-Estépica Florestada, sendo uma vegetação constituída por espécies lenhosas, herbáceas, cactáceas e bromeliáceas. Estima-se que pelo menos 3.150 espécies, distribuídas em 950 gêneros, já foram registradas para a região, sendo que 23% do total de espécies conhecidas são endêmicas. Esse número também inclui a ocorrência de 29 gêneros endêmicos. (FERNADES e QUEIROZ, 2018).

3.2. Base de dados

A base de dados para a estimativa da diversidade de espécies foi obtida por levantamentos florestais realizados ao longo de todo o domínio fitogeográfico da Caatinga, contemplando um total de 194 parcelas distribuídas em 21 fragmentos florestais.

Foram utilizadas duas fontes de dados para realização da pesquisa: os dados provenientes da parceira do Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia (INEMA), composto por inventários florestais realizados entre os anos de 2016 e 2020. O número e o tamanho das parcelas variaram entre os inventários em 0,02 e 0,1 ha. E do grupo FlorestPlots.net, sendo dados de parcelas permanentes de 1 ha, assumiu-se cada parcela como um fragmento florestal (LOPEZ-GONZALEZ et al., 2011).

Os indivíduos arbóreos foram avaliados quanto ao Diâmetro à Altura do Peito (DAP), medido a 1,30 metros do solo, considerando como classificações de inclusão um DAP igual ou superior a 3 cm.

A localização geográfica (latitude e longitude) de cada parcela foi registrada para fins de georreferenciamento. A identificação das espécies seguiu obras botânicas

reconhecidas (FLORA DO BRASIL, BARROSO, 1992; LORENZI, 1992, 2009; QUEIROZ, 2009), bem como herbários virtuais como trópicos.org, fm1.fieldmuseum.org e reflora.jbrj.gov.br. A classificação taxonômica foi baseada no sistema APG IV (CHASE et al., 2016).

As parcelas estão distribuídas nos municípios de Juvenília - MG, Boa Vista Tupim – BA, Canudos – BA, Gruta dos Brejões – BA, Ibiraba Dunas - BA, Campo Alegre de Lurdes – BA, Campo Formoso – BA, Macaúbas – BA, Morro do Chapéu – BA, Xique-Xique – BA, São Vitor – BA, Campina Grande – PB, Patos – PB, Soledade - PB, Floresta – PE, Lagoa Grande – PE, Serra Talhada – PE, São João Garanhuns – PE, Petrolina – PE, Serra Negra do Norte – RN, Mossoró – RN, Macau – RN, Lagoa Salgada – RN, Parque de Furna Feia – RN, Pacajus – CE, Serra das Almas – CE, Araripe-Cariri – CE, Serra da Capivara – PI.

3.3. Obtenção da base de dados

Para a predição da biomassa lenhosa seca, foi aplicada sobre os dados individuais das árvores das parcelas a Equação desenvolvida por Sampaio e Silva (2005).

$$AGB=0,1730 \times DAP^{2,295} \quad (R^2 = 92\%)$$

Em que: AGB é a biomassa seca acima do solo para cada indivíduo arbóreo (kg), DAP é o diâmetro medido a 1,30 m acima do solo (cm), e R^2 é o coeficiente de determinação.

Também foi calculada a riqueza de espécies por parcela, expressa pelo número total de espécies observadas, dado seu valor como indicador de biodiversidade geral (GASTAUER et al., 2021). As análises foram conduzidas no ambiente R, por meio dos pacotes vegan (OKSANEN et al., 2022) e BiodiversityR (Kindt, 2022).

Para a estimativa do volume, foram analisados dados georreferenciados, em seguida foi aplicada uma equação consolidada de acordo com a tipologia presente dos pontos amostrados.

A equação é uma aplicação do modelo de Schumacher e Hall (1933) para a Caatinga Arbórea.

$$V = -9,53089 \times DAP^{2,00951} \times H^{0,84063} \quad (R^2 = 98\%)$$

Em que, V= volume m³; DAP = Altura de 1,30 cm do solo (cm); H = altura (m).

Todos os cálculos e análises foram desenvolvidos utilizando o software Microsoft Office Excel 2019.

3.4. Aquisição e pré-processamento de variáveis geoespaciais

Para construir o modelo preditivo, foi selecionado um conjunto de variáveis ambientais espaciais com base em critérios como importância ecológica, unicidade e resolução espacial, conforme abordagem sugerida por Crowther et al. (2015). Essas variáveis, extraídas de dados de sensoriamento remoto por satélite e registros de estações meteorológicas, foram organizadas em dois grupos principais: topográficas e climáticas.

No total, foram inicialmente consideradas 27 variáveis ambientais, provenientes de fontes como o portal WorldClim (FICK E HIJMANS, 2017) e o EarthEnv. As variáveis climáticas foram compostas por 23 camadas bioclimáticas, baseadas em uma média histórica de 30 anos, e pela evapotranspiração potencial. As variáveis topográficas incluíram atributos como elevação, declividade, orientação (aspecto norte e leste), latitude e longitude absolutas, curvatura do perfil do terreno e o índice de rugosidade da superfície.

As variáveis bioclimáticas foram subdivididas em dois conjuntos: onze derivadas da temperatura (como Temperatura Média Anual, Intervalo Médio Diurno da temperatura, Isotermalidade, Sazonalidade de temperatura, Temperatura máxima do mês mais quente, Temperatura mínima do mês mais frio, Faixa anual de temperatura, Temperatura Média do Quarto de ano Mais Úmido, Temperatura Média do Trimestre Mais Seco, Temperatura Média do Trimestre Mais Quente, Temperatura Média do quarto de ano Mais Frio.) e oito relacionadas à precipitação (como Precipitação média Anual, Precipitação do mês mais chuvoso, Precipitação do mês mais seco, Sazonalidade da Precipitação, Precipitação do trimestre mais úmido, Precipitação do quarto de ano Mais Seco, Precipitação do trimestre mais quente, Precipitação do quarto de ano Mais Frio). A evapotranspiração potencial foi obtida do banco TerraClimate, que combina dados de diferentes origens – incluindo WorldClim, CRU Ts4.0, JRA-55 e a equação de Penman-Monteith.

Todos os dados espaciais passaram por pré-processamento nos softwares ArcMap 10.1 (BUNDY, 2012) e R 4.3.1 (R Core Team, 2025), sendo posteriormente reprojeto para o sistema de coordenadas correspondente a cada ponto de amostragem, com o objetivo de extrair valores exatos de cada variável e assegurar a precisão na geração de mapas e representações visuais.

O propósito deste processo foi avaliar a biomassa, carbono e volume de madeira em diferentes locais da Caatinga, correlacionando os dados de campo com fatores ambientais espaciais, a fim de produzir modelos de previsão em escala regional e interpretar os padrões espaciais que explicam a variação desses elementos. Essas variáveis, muitas vezes disponíveis como produtos espaciais (camadas raster), formam uma grade georreferenciada em que cada pixel representa um valor específico da variável analisada (VAN DEN HOOGEN et al., 2021).

Na etapa inicial, foi construída uma matriz com as coordenadas geográficas de cada ponto de coleta. Em seguida, os arquivos raster de cada covariável foram sobrepostos aos pontos amostrais, e os valores foram extraídos utilizando a função `raster::extract` do pacote *raster* no R (HIJMANS et al., 2021). As informações resultantes foram organizadas em uma matriz final, posteriormente utilizada como conjunto de variáveis explicativas na modelagem estatística.

3.5. Modelagem espacial

Para criar uma previsão espacial para cada elemento estudado a partir dos pontos amostrais, foi utilizado o aprendizado de máquina. Pesquisas recentes apontam esse tipo de modelagem como uma ótima ferramenta para melhorar os modelos globais de variáveis ecológicas (CAI et al., 2022) e diversidade arbórea (MEYER e PEBESMA, 2022).

O algoritmo *Random Forest* (RF) foi usado para modelar a relação entre variáveis ambientais e diversidade usando 500 árvores de decisão aleatórias do tipo regressão. O número de variáveis amostradas aleatoriamente como candidatas em cada divisão foi definido como o número de variáveis explicativas dividido por 3 (parametrização padrão do algoritmo).

A avaliação da precisão do modelo foi realizada por meio da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2), considerando a validação cruzada *k-fold* ($k = 15$).

O RF identifica quais variáveis têm o maior poder preditivo, gerando um fator de importância, que pode ser plotado usando o comando `var_imp_plot`, gerando uma lista em ordem decrescente de importância para as variáveis preditoras da diversidade. Assim, a importância das variáveis ambientais foi analisada por meio de gráficos marginais, mantendo as demais variáveis constantes em um valor médio. A

importância das variáveis é medida pela permuta de variáveis no modelo e pela medição do aumento no erro de estimativa (MSE).

O modelo RF foi aplicado às camadas ambientais em nível de *pixel*, para toda a Caatinga, por meio de álgebra de mapas. Os parâmetros do modelo foram aplicados independentemente a cada *pixel* para produzir o mapa de biomassa, carbono e volume de madeira. Todos os procedimentos de análise, modelagem estatística e espacial foram desenvolvidos em ambiente R (R CORE TEAM, 2021), utilizando os pacotes *MASS* (RIPLEY et al., 2022) e *RandomForest* (CUTLER e WIENER, 2022). Essa abordagem permite explorar os mecanismos que potencialmente governam os padrões da biomassa, carbono e volume de madeira em espécies arbóreas no domínio fitogeográfico da Caatinga.

Do total de variáveis ambientais selecionadas para o estudo, o *Random Forest* excluiu automaticamente aquelas variáveis que apresentam uma alta correlação, pois não possuíam um peso significativo na estimativa, bem como podem diminuir a precisão da variável resposta por serem muito correlacionáveis. As parcelas que ficaram com os valores zerados para as variáveis ambientais, em que, provavelmente, o banco de dados não conseguiu interpolar o valor da variável para aquela coordenada, foram retiradas da modelagem, restando, portanto, 194 parcelas.

Para a modelagem do RF, foram carregados os pacotes de informações geográficas: *ggplot2*, *Raster*, *tidyverse*, *tmap*, *gridExtra*, *magrittr*, *factoextra*, *randomForest*, *caret*, *RColorBrewer*, *hexbin* e para plotar a frequência: *ggpubr* e *MASS*. Devido à natureza inerentemente interativa do clima, topografia e gradientes ambientais em toda a Caatinga, foi assumido que não houve independência acentuada dentro do conjunto completo de variáveis biofísicas extraídas das camadas *raster* compiladas. No entanto, para explicar qualquer colinearidade entre as covariáveis geoespaciais, foi realizada a validação cruzada do modelo.

3.6. Validação e teste do modelo

Na modelagem realizada pelo *Random Forest* foram postos os valores de biomassa, carbono e volume de madeira em razão das variáveis ambientais e em seguida fez-se o ajuste e validação do modelo. Desse modo, realizou-se o método de validação cruzada (cv), com $k=15$, ou seja, dividiu-se o banco de dados em 15 partes (clusters) de 15%. O modelo foi treinado com 85% dos dados e, a cada 15%, foi ajustado e validado.

4. RESULTADOS

4.1. Modelagem espacial e fatores ambientais da biomassa

As 23 variáveis ambientais, apresentadas na Figura 2, são consideradas pelo *Random Forest* como preditoras da biomassa no domínio fitogeográfico da Caatinga e foram ordenadas de acordo com a importância definida pelo modelo RF.

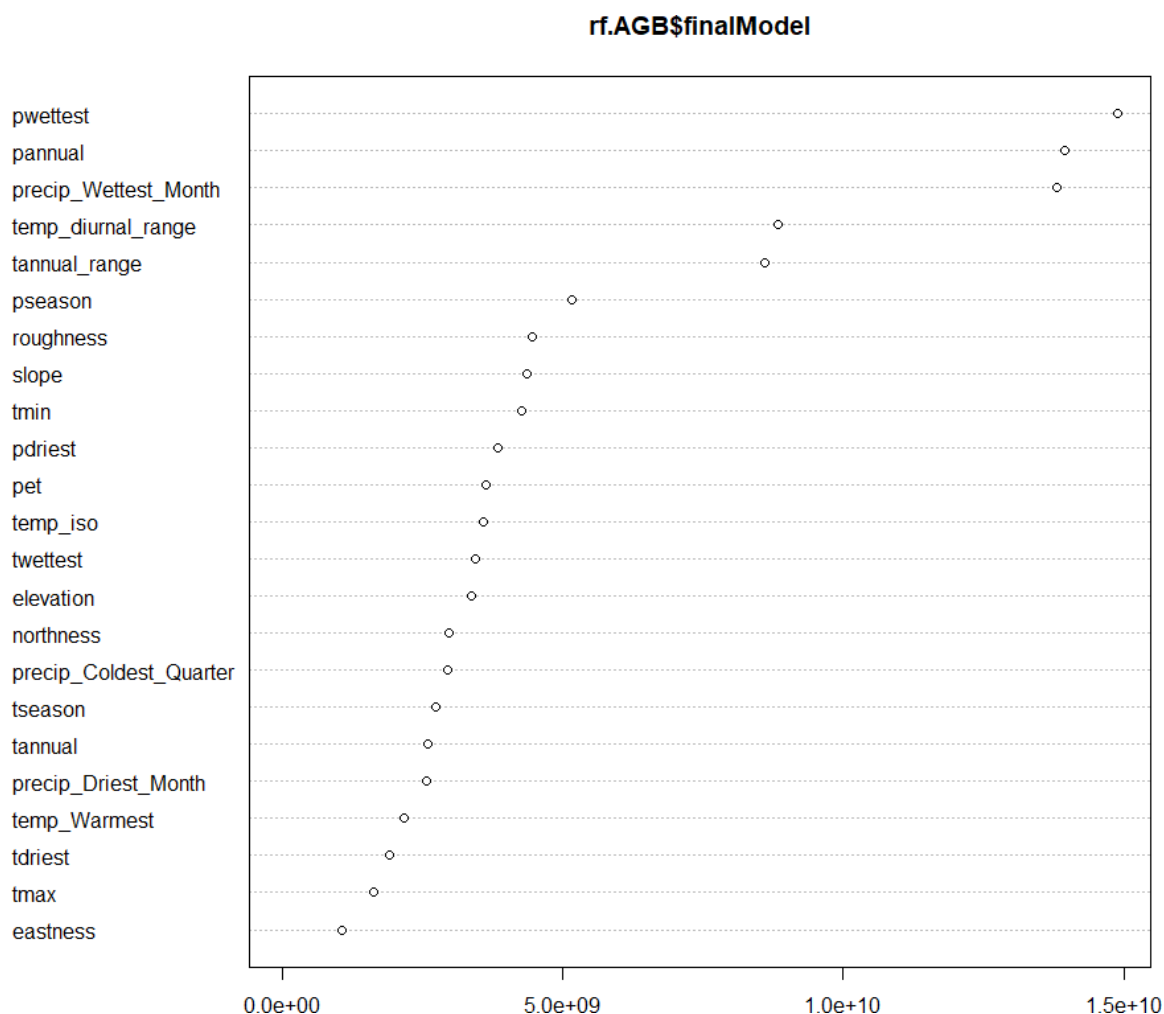


Figura 2 - Variáveis ambientais selecionadas pelo RF por ordem de importância. *Precipitation of Wettest*: Precipitação no Período Chuvoso; *Annual Precipitation*: Precipitação Anual; *Precipitation of Wettest Month*: Precipitação do Mês Mais Úmido; *Mean diurnal temperature range*: Amplitude térmica diária média; *Temperature Annual Range*: Amplitude anual de temperatura; *Precipitation Seasonality*: Sazonalidade da Precipitação; *Roughness*: Rugosidade do Terreno; *Slope*: Inclinação; *Temperature Minimum*: Temperatura Mínima; *Precipitation Driest*: Precipitação do Período Seco; *Potential Evapotranspiration*: Evapotranspiração Potencial; *Temperature Seasonality*: Sazonalidade da Temperatura; *Temperature of Wettest*: Temperatura do Período Mais Úmido; *Elevation*: Elevação; *Northness*: Aspecto Norte; *Precipitation of Coldest Quarter*: Precipitação do Quadrimestre Mais Frio; *Temperature Seasonality*: Sazonalidade da Temperatura; *Annual Temperature*: Temperatura Anual; *Precipitation of Driest Month*: Precipitação do trimestre mais seco; *Temperature of the driest month*:

Temperatura média do mês mais seco; *Temperature of the driest month* : Temperatura média do mês mais seco; *Temperature Maximun*: Temperatura Máxima; *Eastness*: Aspecto Leste.

É possível observar que as variáveis relacionadas à precipitação se mostraram muito significativas na predição da biomassa, sendo que as três primeiras variáveis mais importantes estão relacionadas à precipitação (*Precipitation of Wettest, Annual Precipitation, Precipitation of Wettest Month*), tornando-se um aspecto fundamental para o aumento da biomassa de espécies arbóreas na Caatinga. Além da precipitação, têm-se os fatores relacionados à temperatura, que também se mostraram impulsionadores essenciais da biomassa (Amplitude anual de temperatura; Amplitude térmica diária média).

As variáveis que apresentam menor importância no aumento da biomassa em espécies arbóreas no bioma da Caatinga são a Temperatura máxima (*Tmax*) e aspecto leste (*Eastness*), segundo o modelo gerado pelo RF, uma vez que foram as que menos influenciaram.

Na figura de gradientes ambientais dentro da Caatinga (Fig. 3 e 4), é possível observar que existem regiões mais escuras localizadas na porção norte, ligadas às variáveis de precipitação, revelando maiores concentrações de chuva. Contudo, para temperatura, observa-se, a oeste, valores menores para Temperatura mínima (*Tmin*) e uma distribuição semelhante quando relacionado à Temperatura máxima (*Tmax*) para a região. Os mapas podem ser analisados de forma individual nos apêndices, para uma análise dos gradientes das variáveis mais detalhada.

Variáveis

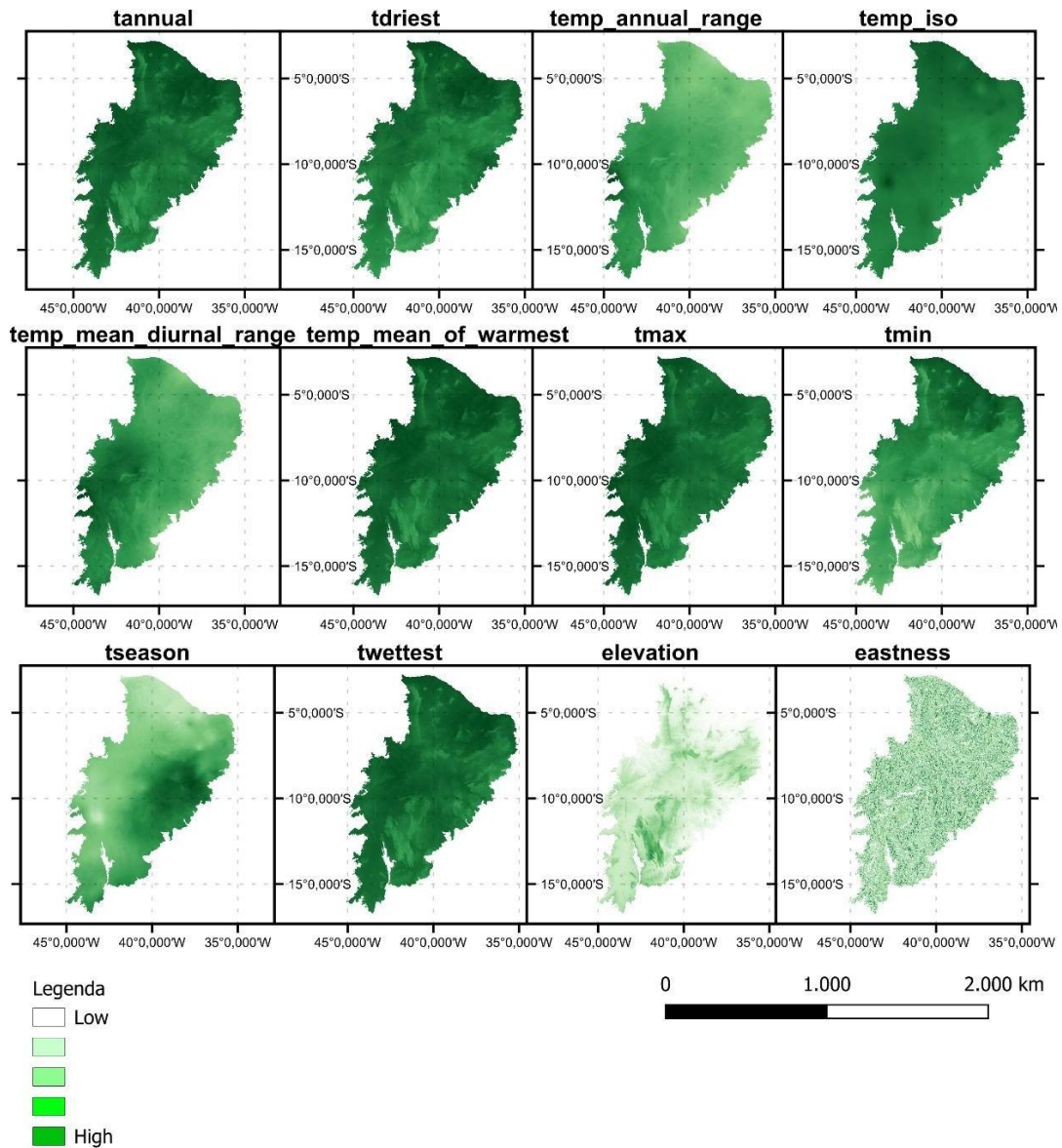


Figura 3 – Expressão das variáveis ambientais ao longo da Caatinga. Onde, **tannual**: *Annual Temperature* (Temperatura Anual); **tdriest**: *temperature of the driest month* (Temperatura média do mês mais seco); **tannual_ranger**: *Temperature Annual Range* (Amplitude anual de temperatura); **temp_iso**: *Isothermality* (Isotermalidade); **temp_diurnal_range**: *mean diurnal temperature range* (Amplitude térmica diária média); **temp_Warmest**: *temperature of the driest month* (Temperatura média do mês mais seco); **tmax**: *Temperature Maximun* (Temperatura Máxima); **tmin**: *Temperature Minimum* (Temperatura Mínima); **tseason**: *Temperature Seasonality* (Sazonalidade da Temperatura); **twettest**: *Temperature of Wetttest* (Temperatura do Período Mais Úmido); **elevation**: *Elevation* (Elevação); **eastness**: *east-facing aspect* (Aspecto leste).

Variáveis

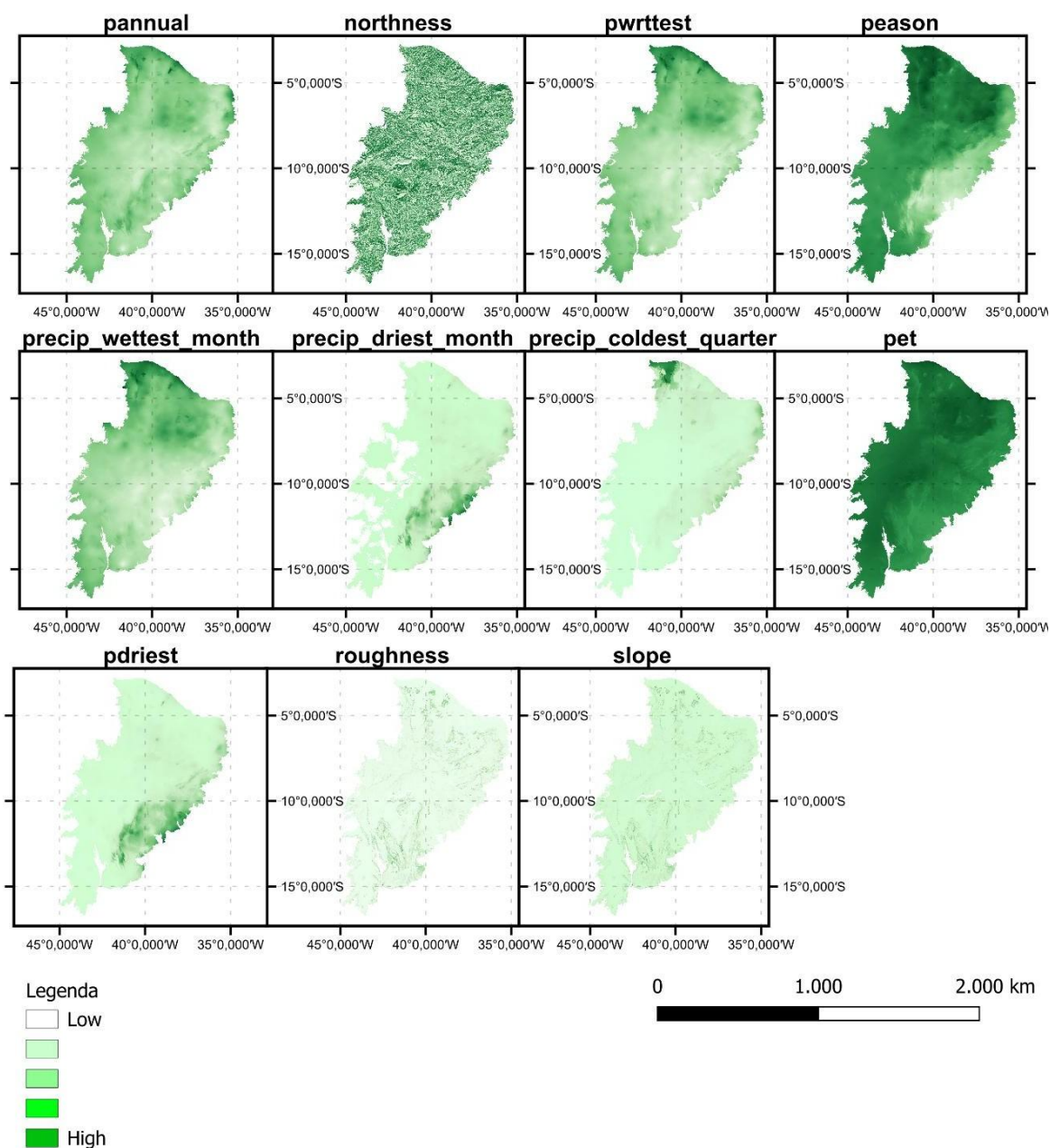


Figura 4 – Expressão das variáveis ambientais ao longo da Caatinga. Onde, **pannual**: *Annual Precipitation* (Precipitação Anual); **northness**: *north-facing aspect* (Aspecto norte); **pwrtest**: *Precipitation of Wettest* (Precipitação no Período Chuvoso); **pseason**: *Precipitation Seasonality* (Sazonalidade da Precipitação); **precip_Wettest_Month**: *Precipitation of Wettest Month* (Precipitação do Mês Mais Úmido); **precip_Driest_Month**: *Precipitation of Driest Month* (Precipitação do trimestre mais seco); **precip_Coldest_Quarter**: *Precipitation of Coldest Quarter* (Precipitação do Quadrimestre Mais Frio); **pet**: *Temperature Evapotranspiration* (Evapotranspiração Potencial); **pdriest**: *Precipitation of Driest* (Precipitação do Período Seco); **roughness**: *Roughness* (Rugosidade); **slope**: *Slope* (Inclinação).

Pela distribuição espacial da temperatura anual (*tannual*), podemos observar regiões a oeste e ao norte como sendo as mais elevadas durante o ano, coincidindo com as regiões com elevada evapotranspiração potencial (*pet*). Pelo mapa de distribuição da sazonalidade de temperatura (*tseason*) (Fig. 3), observa-se que a região leste é a que apresenta maior variação de temperatura ao longo do ano, já a região norte demonstra a menor variação.

Analisando e comparando as variáveis de Temperatura média do mês mais seco (*temp_Warmest*) com a Temperatura do Período Mais Úmido (*twettest*), é possível observar uma semelhança na distribuição do mapa quanto às cores, reforçando que, independentemente do período, as temperaturas no bioma da Caatinga são regularmente elevadas.

Para algumas variáveis ligadas à precipitação, como a precipitação do período seco (*pdriest*) e precipitação do mês mais seco (*precip_driest_month*), há alterações na distribuição ao longo da Caatinga, havendo maiores precipitações a leste, ao contrário das variáveis de Precipitação no Período Chuvoso (*pwettest*), a Precipitação do Mês Mais Úmido (*precip_Wettest_Month*) e a Precipitação do Quadrimestre Mais Frio (*precip_Coldest_Quarter*), que apresentaram valores maiores na parte norte do bioma.

Os mapas de distribuição da rugosidade (*roughness*) e inclinação do terreno (*slope*) (Fig. 4) mostraram que, em determinados lugares do mapa, há maiores variações no relevo. A região da Chapada Diamantina (BA) é constituída por uma grande variedade de depressões e morros, evidenciando no mapa um maior destaque na inclinação do terreno para essas áreas mais ao sudeste.

As 23 variáveis ambientais apresentaram dois diferentes graus de importância de associação (positivo e negativo) (Fig. 5). Na qual a biomassa tende a se elevar conforme o fator aumenta e quando a biomassa tende a reduzir à medida que o fator aumenta, respectivamente.

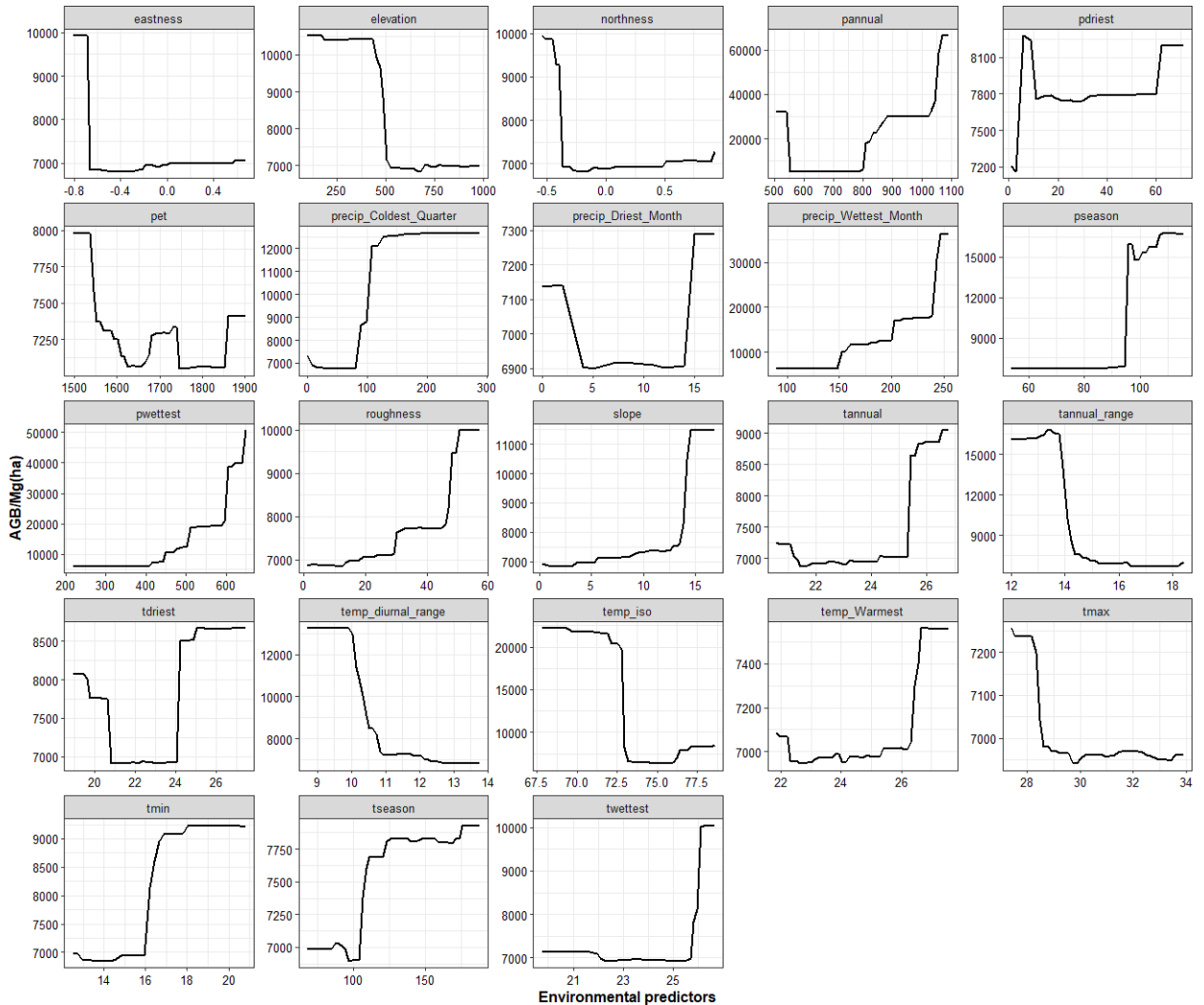


Figura 5 - Gráfico de dependência parcial das 13 variáveis ambientais utilizadas pelo modelo RF para predição da biomassa. Onde: **eastness**: *east-facing aspect* (Inclinação em direção ao leste); **elevation**: *Elevation* (Elevação); **northness**: *north-facing aspect* (Inclinação em direção ao norte); **pannual**: *Annual Precipitation* (Precipitação Anual); **pdriest**: *Precipitation of Driest* (Precipitação do Período Seco); **pet**: *Temperature Evapotranspiration* (Evapotranspiração Potencial); **precip_Coldest_Quarter**: *Precipitation of Coldest Quarter* (Precipitação do Quadrimestre Mais Frio); **precip_Driest_Month**: *Precipitation of Driest Month* (Precipitação do trimestre mais seco); **precip_Wettest_Month**: *Precipitation of Wettest Month* (Precipitação do Mês Mais Úmido); **pseason**: *Precipitation Seasonality* (Sazonalidade da Precipitação); **pwettest**: *Precipitation of Wettest* (Precipitação no Período Chuvoso); **roughness**: *Roughness* (Rugosidade); **slope**: *Slope* (Inclinação); **tannual**: *Annual Temperature* (Temperatura Anual); **tannual_ranger**: *Temperature Annual Range* (Amplitude anual de temperatura); **tdriest**: *temperature of the driest month* (Temperatura média do mês mais seco); **temp_diurnal_range**: *mean diurnal temperature range* (Amplitude térmica diária média); **temp_iso**: *Isothermality* (Isotermalidade); **temp_Warmest**: *temperature of the driest month* (Temperatura média do mês mais seco); **tmax**: *Temperature Maximun* (Temperatura Máxima); **tmin**: *Temperature Minimum* (Temperatura Mínima); **tseason**: *Temperature Seasonality* (Sazonalidade da Temperatura); **twettest**: *Temperature of Wettest* (Temperatura do Período Mais Úmido).

Para precipitação anual (*pannual*), é notável o aumento significativo da biomassa quando a precipitação passa dos 800mm, o mesmo ocorre com a biomassa, há um aumento expressivo quando a precipitação no período chuvoso (*pwettest*)

ultrapassa os 400mm. Com relação às características do terreno, a biomassa aumentou substancialmente com a rugosidade (*Roughness*) e Inclinação (*Slope*), alcançando α maiores.

Em contraste, o aumento da elevação (*Elevation*), Evapotranspiração Potencial (*Temperature Evapotranspiration*) e Isotermalidade (*Isothermality*) estão associadas à menor biomassa (Fig. 5). Para a variável elevação (*elevation*), pode-se observar que há uma redução drástica dos valores da biomassa quando a altitude do terreno aumenta, próximo a 500m.

Analisando ainda a Figura 5, observa-se um aumento da biomassa quando a temperatura mínima (*tmin*) e máxima (*tmax*) variam entre 16°C e 29°C, já quando a temperatura anual (*tannual*) fica acima de 25°C, mais ou menos, a biomassa tende a aumentar rapidamente.

Observa-se também que a biomassa se eleva com muita rapidez quando sazonalidade da temperatura (*tseason*) passa de 100. Nota-se que, quanto maior a sazonalidade da temperatura (desvio padrão ×100), ou seja, quanto maior a variabilidade de temperaturas ao longo do ano, maior se torna a biomassa das espécies arbóreas.

4.2. Variação espacial da Biomassa

Podemos observar que os maiores valores de biomassa se encontram ao norte da Caatinga, onde está localizado o extremo nordeste do País (Fig. 6), verifica-se também uma quantidade alta de biomassa em uma região pequena na região leste do Rio Grande do Norte, no sul do Ceará e no oeste do Piauí. A menor quantidade de biomassa é observada no norte do estado da Bahia, que faz divisa com o estado do Piauí.

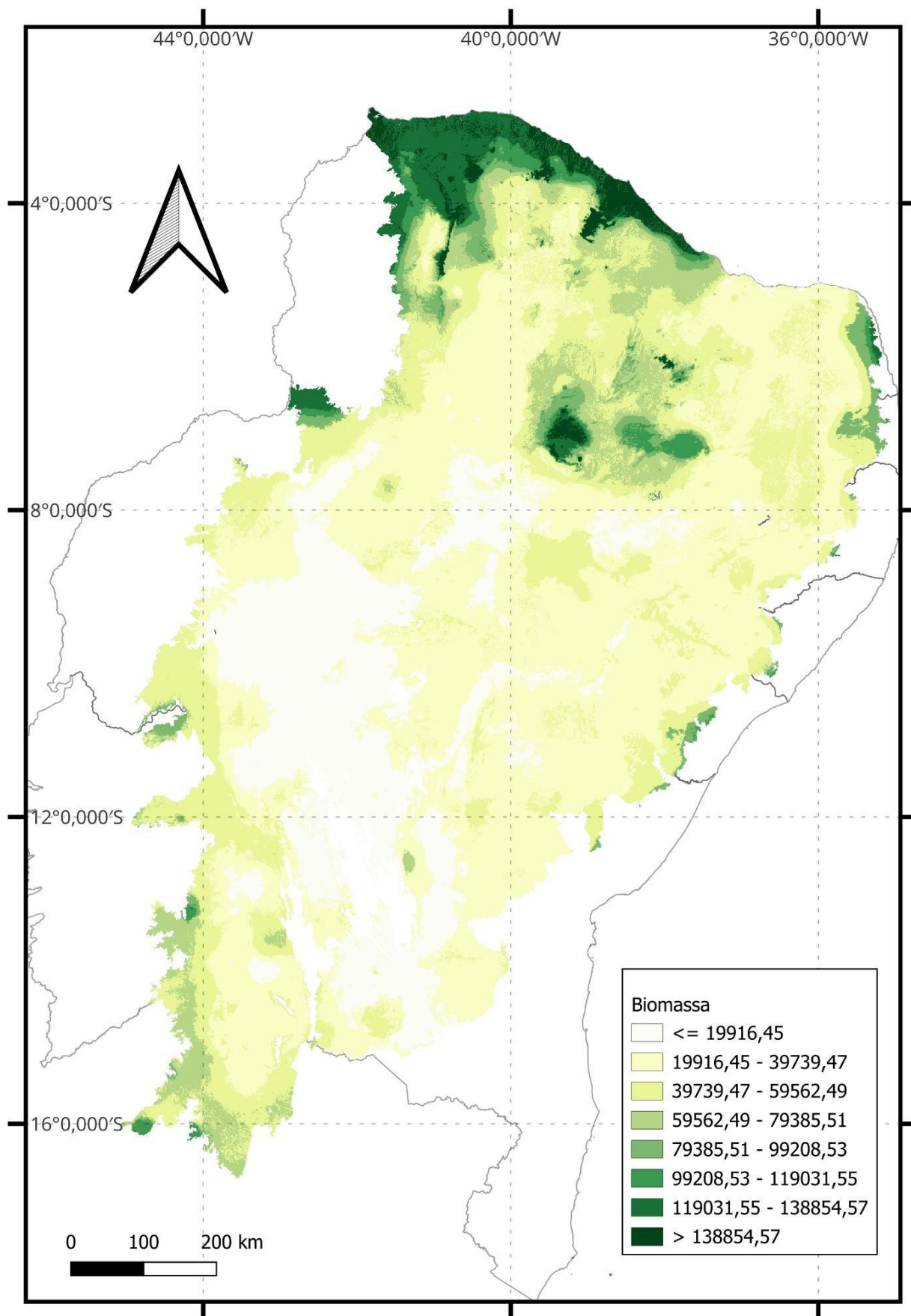


Figura 6- Mapa de distribuição da biomassa dentro do domínio fitogeográfico da Caatinga.

Na porção de Caatinga presente no norte de Minas Gerais, os valores de biomassa chegam até a 99208,53 Mg, apresentando algumas áreas, próximas à divisa com a Bahia, com valores inferiores (19916,45 Mg a 39739,47 Mg).

Na região central do estado da Bahia, a biomassa apresenta valores mínimos, não passando de 39739,47 Mg, aproximadamente, sendo a região referente às áreas da Chapada Diamantina, onde se encontram os municípios de Santo Sé e Morro do Chapéu. Do lado Oeste, existe uma zona de transição com o domínio fitogeográfico do Cerrado, havendo uma descontinuação da Caatinga, onde em suas bordas vê-se um aumento de biomassa, com valores superiores a 59562,49 MG, onde a microrregião de Bom Jesus da Lapa chega a ter valores maiores que 119031,55 Mg.

Nas regiões Sudeste e Sudoeste do Piauí, que estão incluídas na Caatinga, a biomassa também se revela menor, mantendo-se em patamares semelhantes até a Área de Preservação Permanente (APP) Dunas e Veredas do Baixo-Médio São Francisco, localizada no Vale do São Francisco, na Bahia.

O estado do Ceará exibe uma acentuada variabilidade na biomassa ao longo de toda a sua extensão, sendo as regiões Norte e Nordeste as que apresentam os maiores número. Juntamente com a parte Norte e Centro-Norte do Piauí, formam a maior área do domínio fitogeográfico onde se registram os índices mais elevados de biomassa, sendo maior que 138854,57 Mg. Seguindo para o sul do estado do Ceará, essa biomassa sofre uma ligeira redução, aumentando novamente nas porções Centro-Sul e Sul.

A porção do litoral oriental do Rio Grande do Norte mostra valores variando de 59562,49 Mg a 138854,57 Mg. Já no restante do estado a biomassa apresenta valores inferiores a 59562,49 Mg, seguindo um padrão relacionado as outras regiões estudadas.

No estado da Paraíba, a biomassa é mais elevada no agreste paraibano e na mata paraibana, reduzindo na porção do Borborema e volta a elevar-se no sertão paraibano, chegando aos valores máximos de biomassa para este domínio fitogeográfico.

A porção dos estados de Sergipe, Alagoas, Pernambuco, pertencentes à Caatinga, apresentou uma variação igual ao estado de Minas Gerais, porém as partes que demonstraram maiores valores de biomassa são mínimas e estão presentes na zona de transição com a Mata Atlântica.

4.3. Modelagem espacial e fatores ambientais para volume de madeira

As 23 variáveis ambientais, apresentadas na Figura 7, são consideradas pelo *Random Forest* como preditoras do volume de madeira no domínio fitogeográfico da Caatinga, elas estão ordenadas de acordo com a importância definida pelo modelo RF.

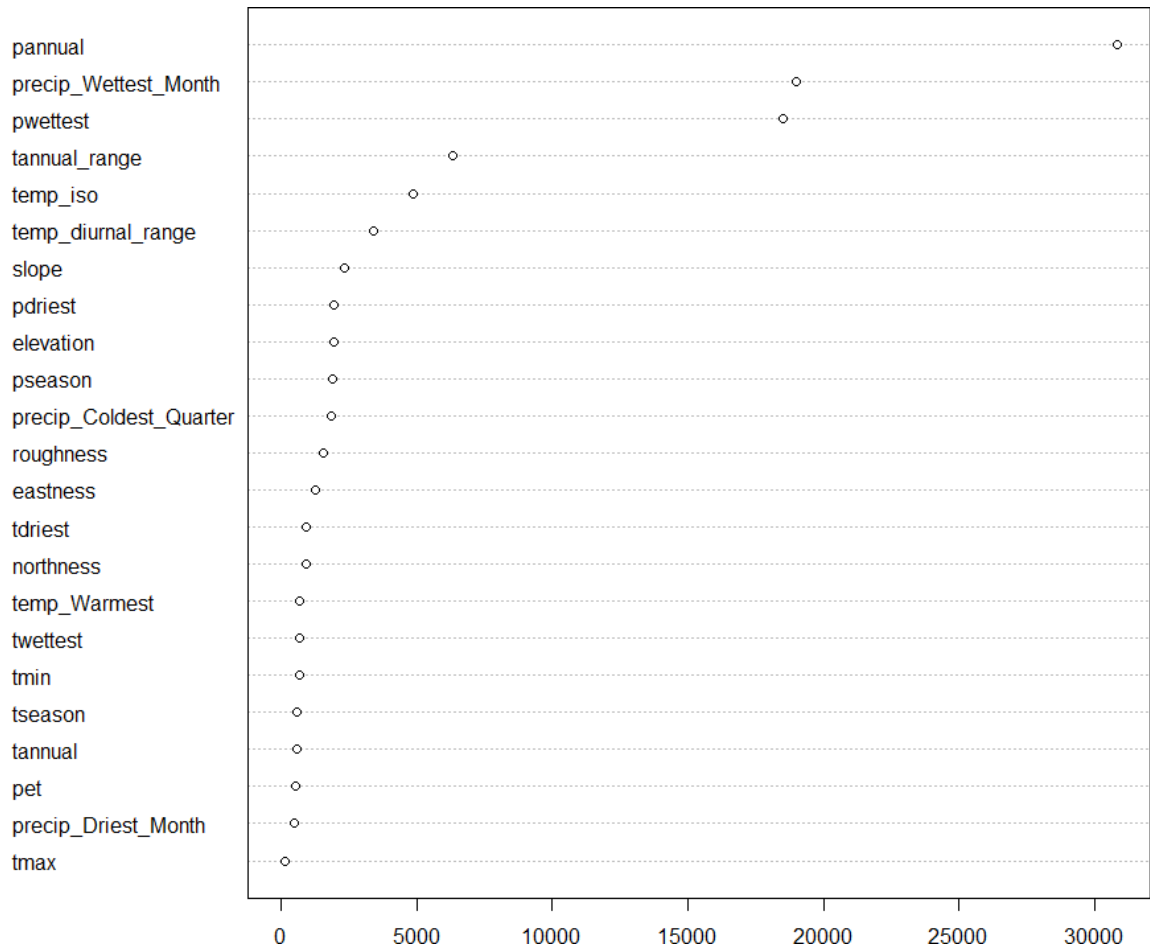


Figura 7 - Variáveis ambientais selecionadas pelo RF por ordem de importância. *Annual Precipitation*: Precipitação Anual; *Precipitation of Wettest Month*: Precipitação do Mês Mais Úmido; *Precipitation of Wettest*: Precipitação no Período Chuvoso; *Temperature Annual Range* (Amplitude anual de temperatura); *Temperature Seasonality*: Sazonalidade da Temperatura; *Mean diurnal temperature range*: Amplitude térmica diária média; *slope*: Inclinação; *Precipitation Driest*: Precipitação do Período Seco; *Elevation*: Elevação; *Precipitation Seasonality*: Sazonalidade da Precipitação; *Precipitation of Coldest Quarter*: Precipitação do Quadrimestre Mais Frio; *Roughness*: Rugosidade do Terreno; *Eastness*: Aspecto Leste; *Temperature of the driest month* : Temperatura média do mês mais seco; *Northness*: Aspecto Norte; *temperature of the driest month* (Temperatura média do mês mais seco); *Temperature of Wettest*: Temperatura do Período Mais Úmido; *Temperature Minimum*: Temperatura Mínima; *Temperature Seasonality* (Sazonalidade da Temperatura); *Annual Temperature*: Temperatura Anual; *Temperature Evapotransporation* (Evapotranspiração Potencial); *Precipitation of Driest Month*: Precipitação do trimestre mais seco; *Temperature Maximun*: Temperatura Máxima.

Pode-se observar que as variáveis relacionadas à precipitação também se mostraram muito importantes na predição do volume, sendo iguais as da biomassa,

mudando somente o grau de importância (*Annual Precipitation, Precipitation of Wettest Month, Precipitation of Wettest*), sendo um aspecto fundamental para o aumento do tamanho do volume de madeira de espécies arbóreas na Caatinga. Seguindo a precipitação, têm-se os fatores relacionados à temperatura, que também se mostraram importantes impulsionadores do volume (*Temperature Annual Range, Temperature Seasonality, Mean diurnal temperature range*).

As variáveis Temperatura máxima (*Tmax*) e: Precipitação do trimestre mais seco (*Precipitation of Driest Month*) não se mostraram como de grande importância no aumento do volume em espécies arbóreas na Caatinga, visto que foram as que menos influenciaram, segundo o modelo gerado pelo RF.

As 23 variáveis ambientais apresentaram dois diferentes graus de importância de associação (positivo e negativo), idêntico ao que foi encontrado na biomassa e com as mesmas características (Fig. 8).

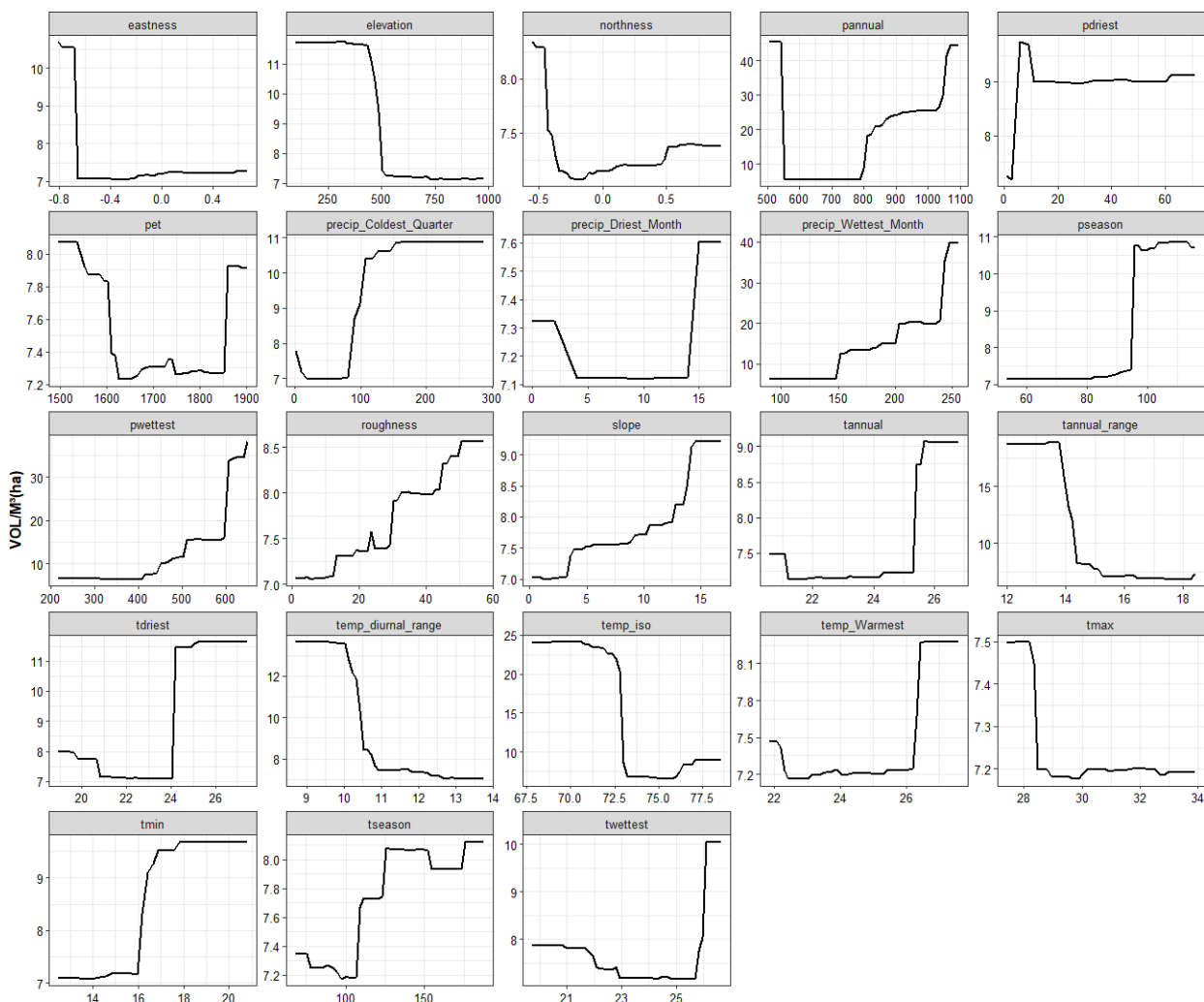


Figura 8 - Gráfico de dependência parcial das 23 variáveis ambientais utilizadas pelo modelo RF para

predição do volume de madeira. Onde: **eastness**: *east-facing aspect* (Inclinação em direção ao leste); **elevation**: *Elevation* (Elevação); **northness**: *north-facing aspect* (Inclinação em direção ao norte); **pannual**: *Annual Precipitation* (Precipitação Anual); **pdriest**: *Precipitation of Driest* (Precipitação do Período Seco); **pet**: *Temperature Evapotranspiration* (Evapotranspiração Potencial); **precip_Coldest_Quarter**: *Precipitation of Coldest Quarter* (Precipitação do Quadrimestre Mais Frio); **precip_Driest_Month**: *Precipitation of Driest Month* (Precipitação do trimestre mais seco); **precip_Wettest_Month**: *Precipitation of Wettest Month* (Precipitação do Mês Mais Úmido); **pseason**: *Precipitation Seasonality* (Sazonalidade da Precipitação); **pwettest**: *Precipitation of Wettest* (Precipitação no Período Chuvoso); **roughness**: *Roughness* (Rugosidade); **slope**: *Slope* (Inclinação); **tannual**: *Annual Temperature* (Temperatura Anual); **tannual_ranger**: *Temperature Annual Range* (Amplitude anual de temperatura); **tdriest**: *temperature of the driest month* (Temperatura média do mês mais seco); **temp_diurnal_range**: *mean diurnal temperature range* (Amplitude térmica diária média); **temp_iso**: *Isothermality* (Isotermalidade); **temp_Warmest**: *temperature of the driest month* (Temperatura média do mês mais seco); **tmax**: *Temperature Maximun* (Temperatura Máxima); **tmin**: *Temperature Minimum* (Temperatura Mínima); **tseason**: *Temperature Seasonality* (Sazonalidade da Temperatura); **twettest**: *Temperature of Wettest* (Temperatura do Período Mais Úmido).

Os gráficos de dependência espacial da biomassa e do volume de madeira apresentaram um padrão bastante semelhante, mostrando uma tendência comparativa consistente nas variáveis analisadas. É possível notar que algumas variáveis do volume de madeira se alteram relativamente pouco quando comparadas com as de biomassa e outras são similares.

4.4. Variação espacial do Volume de madeira

Podemos observar que os maiores valores de volume de madeira se encontram ao norte da Caatinga, onde está localizado o extremo nordeste do País (Fig. 9). Nessa região, divide-se três estados PE, PI e CE. Do lado de Pernambuco, há o município de Araripina (Polo Gesseiro), ou seja, há uma grande exploração de vegetação nativa para essa área, isso pode ter contribuído para diminuição dos estoques de biomassa. Do lado do CE, existe a Serra do Araripe, que é conservada até certo ponto, mas também há uso e ocupação devido à fertilidade das terras.

A menor quantidade de biomassa é observada no norte do estado da Bahia, que faz divisa com o estado do Piauí, semelhante às características apresentadas no mapa da biomassa.

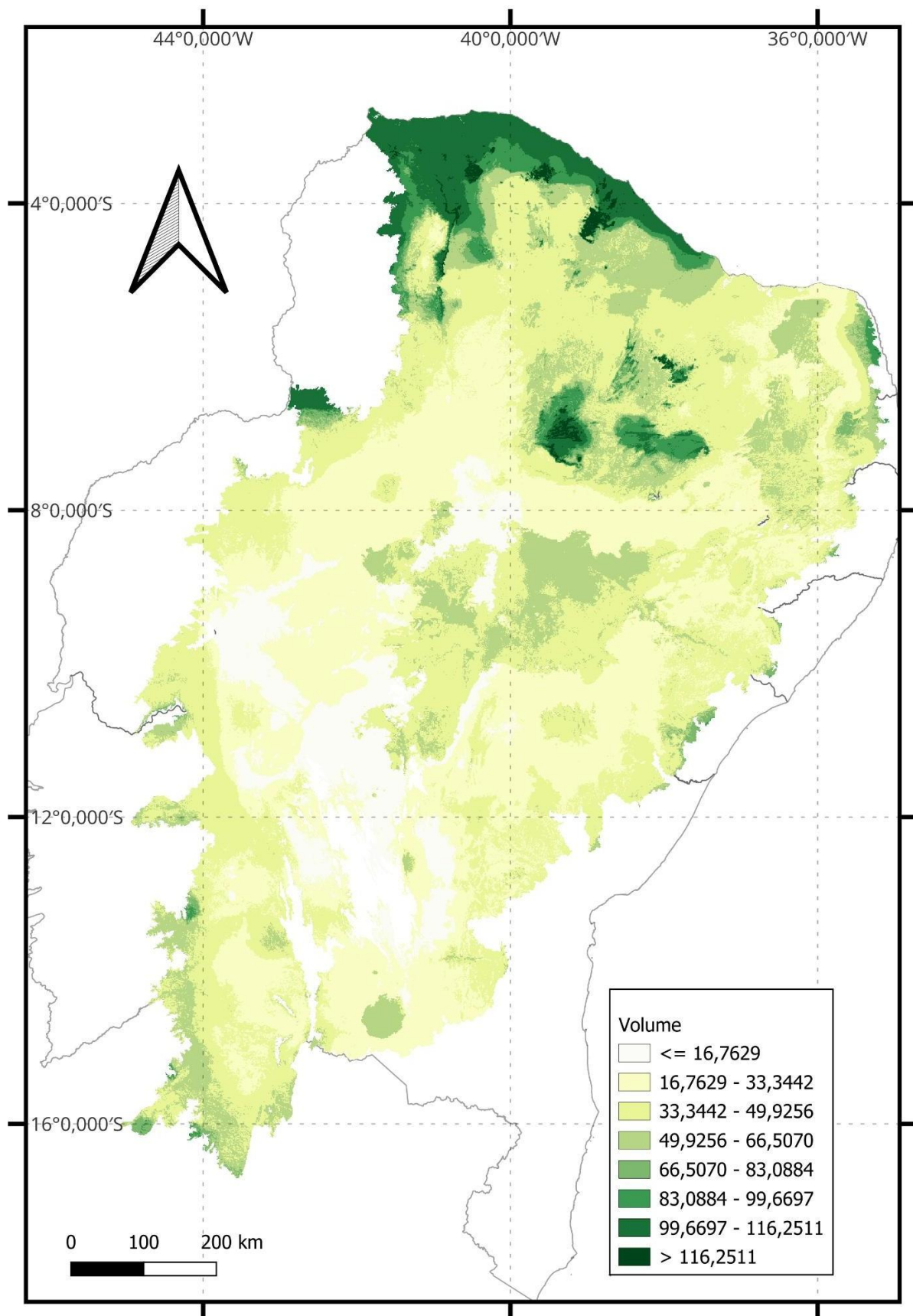


Figura 9- Mapa de distribuição do volume de madeira dentro do domínio fitogeográfico da Caatinga

As mudanças observadas nesse mapa se dão principalmente na região central do bioma, na divisa entre o estado da Bahia com o estado de Pernambuco, o volume de madeira nessa região apresentou valores entre: 33,3442 m³ a 66,5070 m³.

O mapa como um todo não apresentou tantas áreas com valores abaixo de 16,7629 m³, sendo representado pela cor branca, cor esta que estava muito presente no mapa de biomassa.

No estado da Paraíba, o volume segue um padrão semelhante do agreste paraibano até a porção do Borborema e se eleva no sertão paraibano, chegando aos valores máximos do volume de madeira para este domínio fitogeográfico.

A porção do litoral oriental do Rio Grande do Norte mostrou valores variando de 49,9256 m³ a 116,2511 m³. Já no restante do estado o volume apresentou valores inferiores a 66,5070 m³, seguindo um padrão relacionado as outras regiões estudadas.

O estado do Ceará exibe uma acentuada variabilidade no volume ao longo de toda a sua extensão, sendo as regiões Norte e Nordeste as que apresentaram os maiores valores. Juntamente com a parte Norte e Centro-Norte do Piauí, formaram a maior área do domínio fitogeográfico onde se registraram os índices mais elevados de volume de madeira, sendo maior que 116,2511 m³. Seguindo para o sul do estado do Ceará, esse volume sofre uma ligeira redução, aumentando novamente nas porções Centro-Sul e Sul.

5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam a influência direta das variáveis climáticas e topográficas sobre a distribuição espacial da biomassa e do volume de madeira na Caatinga. A partir da modelagem com o algoritmo *Random Forest*, foi possível observar que variáveis como precipitação anual, precipitação no trimestre mais úmido, temperatura média do mês mais quente e rugosidade do terreno foram determinantes na previsão das áreas com maior produtividade.

A relação positiva entre variáveis climáticas e biomassa é reforçada por Dantas et al. (2022) e Grace et al. (2016), os quais apontaram que a distribuição da vegetação em ecossistemas tropicais secos está diretamente associada aos regimes de precipitação e às variações de temperatura. De forma coerente, este estudo identificou maior biomassa e volume em áreas com elevada precipitação trimestral, característica típica das regiões mais úmidas da Caatinga.

Esse comportamento é amplamente sustentado por estudos recentes, como o de Santos et al. (2023), que modelaram a biomassa acima do solo na Caatinga utilizando o algoritmo *Random Forest* e sensores remotos, identificando que a precipitação anual e a sazonalidade térmica foram as variáveis mais influentes, resultado semelhante ao encontrado neste trabalho. Além disso, os autores destacaram que áreas com maior umidade e estabilidade térmica apresentaram maior acúmulo de biomassa — fato observado também nas porções centro-sul do Ceará e norte do Piauí, em seus mapas de predição.

A maior precipitação encontrada na região norte do bioma Caatinga se dá pela influência do sistema atmosférico Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que proporciona precipitações no período de fevereiro a maio mais elevadas, principalmente no Estado do Ceará (FERREIRA e MELLO, 2005; SILVA et al., 2005).

Porém, essa mesma Zona torna a região Nordeste do País mais afetada pelas secas (anuais ou plurianuais). As variações no clima provocadas pela ZCIT se somam a outros fatores meteorológicos e geográficos que, juntos, definem como e quando chove na Zona da Mata e no Nordeste Meridional (ANDRADE, 2009).

A Figura 5 apresenta os gradientes ambientais na variável precipitação no período seco (*Pdriest*), observou-se que a região leste apresentou maiores valores de precipitação, mesmo no período de seca desse bioma, e isso se dá devido à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que atua no verão, provocando chuvas de

primavera e verão nessa localidade. Por sua vez, as frentes frias aparecem no inverno e atingem com mais força o sul do litoral baiano, tendo seu pico de ação ao norte, principalmente no município de Recife, porém não ultrapassa o litoral da Bahia (MOLION e BERNARDO, 2002, PEREIRA, 2018). A influência do Oceano Atlântico é tão marcante que o tipo de clima da região foi classificado como “tropical litorâneo do Nordeste oriental” por Mendonça e Danni-Oliveira (2007).

No que diz respeito à variável sazonalidade da precipitação (*pseason*) (Fig. 5), que mede quanto a chuva varia ao longo do ano, sendo que quanto maior o valor do índice, maior a variação entre os meses (O'DONNELL e IGNIZIO, 2012). Esse índice é calculado como o Coeficiente de Variação (CV) da precipitação mensal, quando o CV é maior que 100%, isso significa que a variação mensal da chuva (desvio padrão) foi maior do que a média anual de chuva, confirmando que as chuvas na Caatinga não são regulares, e sim concentradas em poucos meses do ano, observando o gráfico de dependência parcial (Fig. 6), verifica-se que esse valor foi superior a 100%.

Apesar de haver uma variação de temperaturas máximas e mínimas (Fig. 5) no norte da Caatinga, percebe-se que, no geral, as temperaturas ao norte são majoritariamente mais elevadas, não sendo muito relevante na redução da biomassa e do volume, conforme mostrado pelo gráfico de dependência parcial (Fig. 6).

A temperatura durante o trimestre mais úmido do ano (*twettest*) é uma variável relevante para analisar se o acúmulo de biomassa e o incremento volumétrico da madeira são influenciados por oscilações térmicas atípicas, especialmente em períodos de maior disponibilidade hídrica (O'DONNELL E IGNIZIO, 2012). De acordo com os dados analisados, observa-se um aumento nos valores de biomassa e volume a partir de temperaturas médias superiores a 25 °C, sugerindo que condições mais frias não favorecem o crescimento ativo da vegetação lenhosa na Caatinga.

A variável sazonalidade da temperatura (*tseason*) representa a flutuação térmica anual, expressa pela razão entre o desvio padrão e a média das temperaturas mensais (O'DONNELL E IGNIZIO, 2012). Na Caatinga, essa variabilidade térmica pode ultrapassar 100% em termos de coeficiente de variação (CV), o que indica grande instabilidade climática ao longo do ano. Mesmo com essa instabilidade, notou-se que os maiores volumes de madeira tendem a ocorrer em áreas onde a temperatura média oscila em torno de 25 °C, corroborando a hipótese de que variações moderadas podem favorecer o acúmulo de biomassa lenhosa (TROVÃO et al., 2007).

A análise da temperatura máxima (tmax) mostra que a produtividade florestal tende a se manter estável até aproximadamente 29 °C. Acima desse limite, há indicativos de redução no volume de madeira acumulado, possivelmente devido ao estresse térmico e hídrico. Áreas com temperaturas máximas mais elevadas também apresentam maior evapotranspiração, o que compromete o balanço hídrico das plantas e pode limitar a fotossíntese (SUDENE, 2021).

Durante o período seco, a vegetação da Caatinga adota estratégias de adaptação, como a perda de folhas, que reduz a área fotossintética e, por consequência, a produção de biomassa (DE FARIAS et al., 2019). Embora esse mecanismo seja essencial para a sobrevivência, ele limita o crescimento volumétrico da vegetação, sobretudo em regiões onde o período seco se estende por mais de seis meses. A temperatura do solo também exerce papel fundamental no ciclo da biomassa, influenciando diretamente a atividade radicular e microbiana, fatores indispensáveis para o crescimento das espécies arbóreas (DAUBENMIRE, 1974).

A topografia, por sua vez, mostrou-se como um importante modulador da distribuição de biomassa e volume de madeira. Regiões com maior altitude e declividade, como a Chapada Diamantina, apresentaram estoques mais elevados, provavelmente devido à presença de solos mais profundos e menor exposição à radiação direta, essa região apresenta áreas planálticas e serranas, com altitudes que variam de 500m a 1000m. Possui um clima tropical com precipitações que vão de 700mm a 1000mm anuais e 15° a 25°C de temperatura (MMA, 2010). Os gráficos de dependência parcial das variáveis de relevo indicaram que encostas suaves e áreas de baixada acumulam mais biomassa, o que pode estar relacionado à maior retenção hídrica e à deposição de matéria orgânica. Esses dados reforçam estudos anteriores que apontam para o papel central da topografia na organização da estrutura florestal (RADAMBRASIL, 1983; LINS, 1989).

A Caatinga, sendo altamente vulnerável à variabilidade climática, poderá ter sua capacidade de acumular biomassa e madeira drasticamente reduzida em cenários futuros, pois o bioma tem relação direta entre as mudanças climáticas e os estoques florestais. O IPCC (2018) projeta aumento da temperatura global e redução na precipitação, o que poderá resultar em perda de até 50% da biomassa do bioma até o final do século (CASTANHO et al., 2020). Tais mudanças impactam diretamente a produtividade florestal e, portanto, o potencial de sequestro de carbono e oferta de produtos madeireiros.

Projeções futuras indicam que espécies herbáceas de ciclo curto podem substituir gradativamente as espécies lenhosas, implicando a diminuição do estoque de biomassa e volume comercial. Essa redução, somada à degradação do solo e salinização, compromete a sustentabilidade do bioma (GALINDO et al., 2008; SMITH E DONOGHUE, 2008; MARENGO et al., 2011).

O bioma da Caatinga apresenta, apenas, 2% sob proteção integral, colocando em risco os serviços ecossistêmicos oferecidos pela biomassa florestal, demandando esforços coordenados de restauração e manejo (IBGE, 2019a). Sendo necessárias, com urgência, estratégias de conservação voltadas para manutenção da estrutura florestal e recomposição da biomassa em áreas degradadas (BARBOSA E GOMES FILHO, 2022).

Por fim, Lima et al. (2020) ressaltaram como a conversão da Caatinga para usos antrópicos reduz a respiração do solo e dos sistemas radiculares, alterando significativamente os fluxos de carbono. Essa dinâmica também ajuda a justificar os menores valores de biomassa nas regiões sul do Piauí e extremo oeste da Bahia, onde o histórico de uso intensivo do solo pode ter causado degradação da vegetação nativa.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo reforçam a importância do monitoramento contínuo e de estratégias preditivas para o manejo da biomassa e do volume de madeira no bioma Caatinga. Ferramentas como sensoriamento remoto, modelos baseados em algoritmos de aprendizado de máquina como o *Random Forest* e dados ambientais de alta resolução oferecem caminhos promissores para prever tendências e embasar políticas públicas voltadas à conservação e ao uso sustentável dos recursos florestais no semiárido brasileiro.

6. CONCLUSÃO

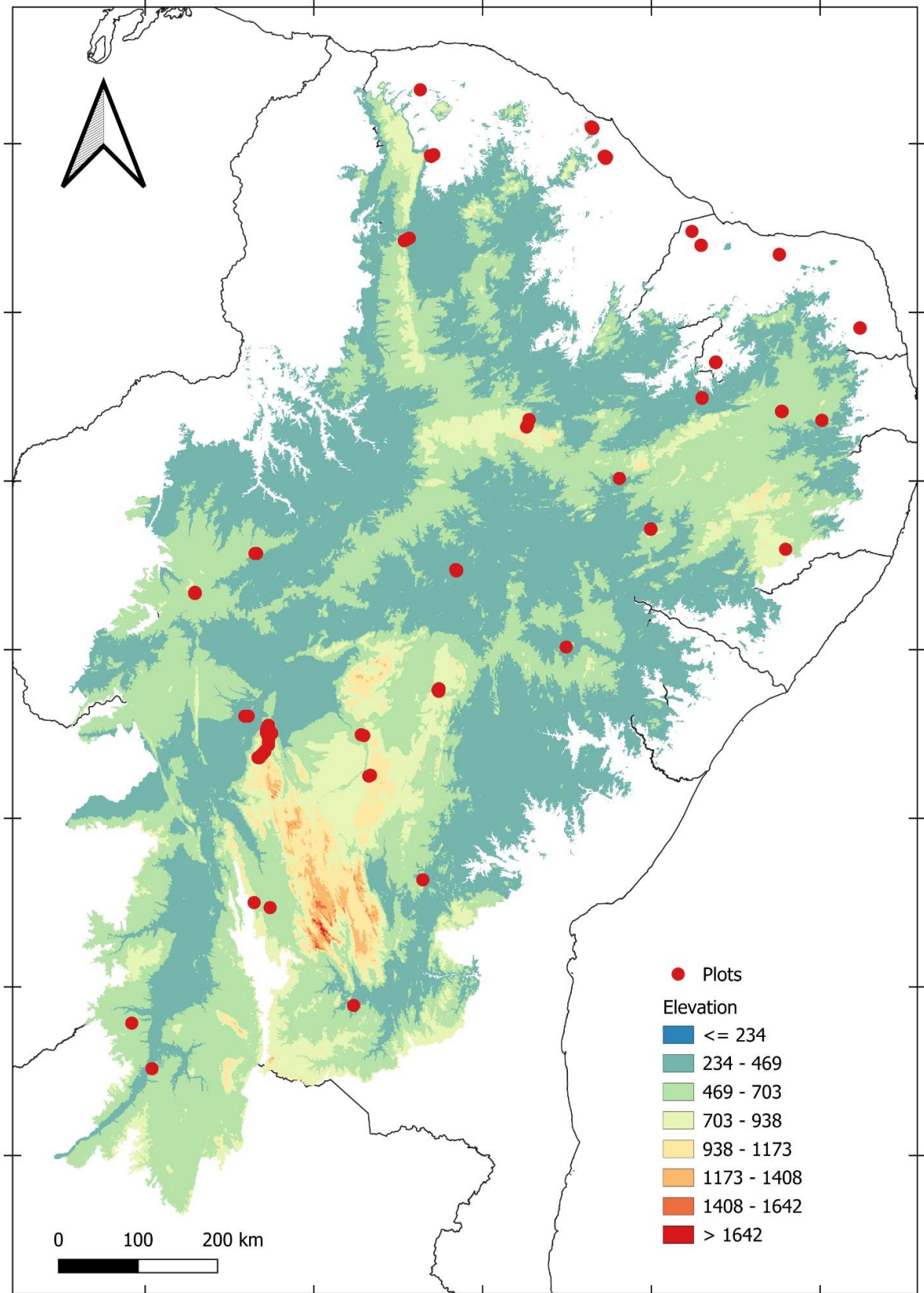
O presente estudo mostrou que a biomassa e o volume de madeira das espécies arbóreas do bioma Caatinga sofrem influência dos fatores climáticos e topográficos. Destacando uma forte dependência hidrométrica da vegetação, sendo uma característica comum em ecossistemas tropicais sazonais e semiáridos, já a influência de fatores topográficos indica a importância do relevo na composição da vegetação e dos estoques florestais.

O uso da modelagem espacial aplicada à mensuração florestal provou ser um método eficiente e de baixo custo para o monitoramento de ecossistemas amplos e heterogêneos. Este trabalho também reforçou a importância e relevância da inclusão de tecnologias geoespaciais no contexto da ecologia e manejo florestal, especialmente em biomas carentes de dados como a Caatinga.

7. APÊNDICES

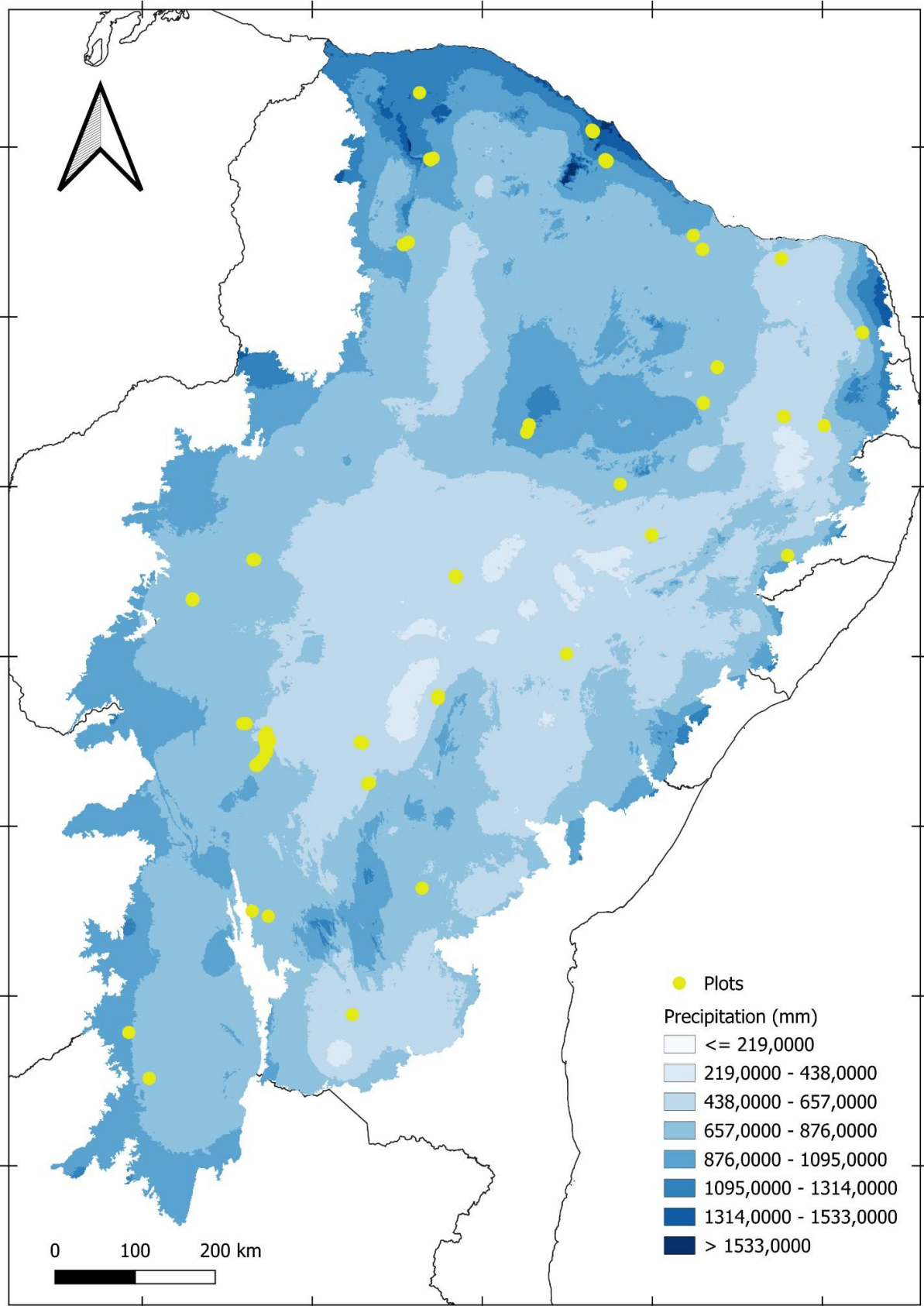
APÊNDICE A

Variável Elevação em toda a extensão do bioma Caatinga.



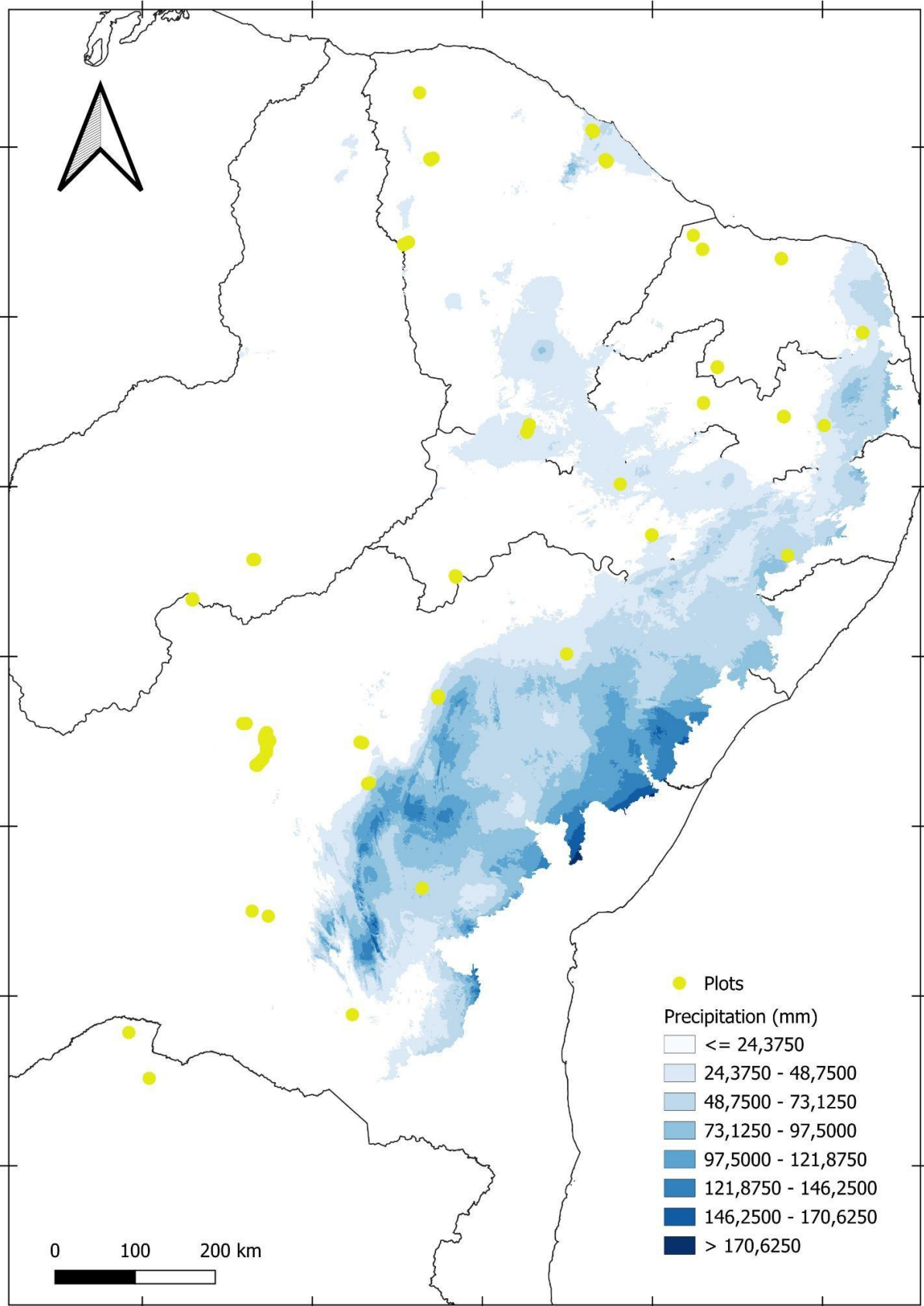
APÊNDICE B

Variável Precipitação Anual em toda a extensão do bioma Caatinga.



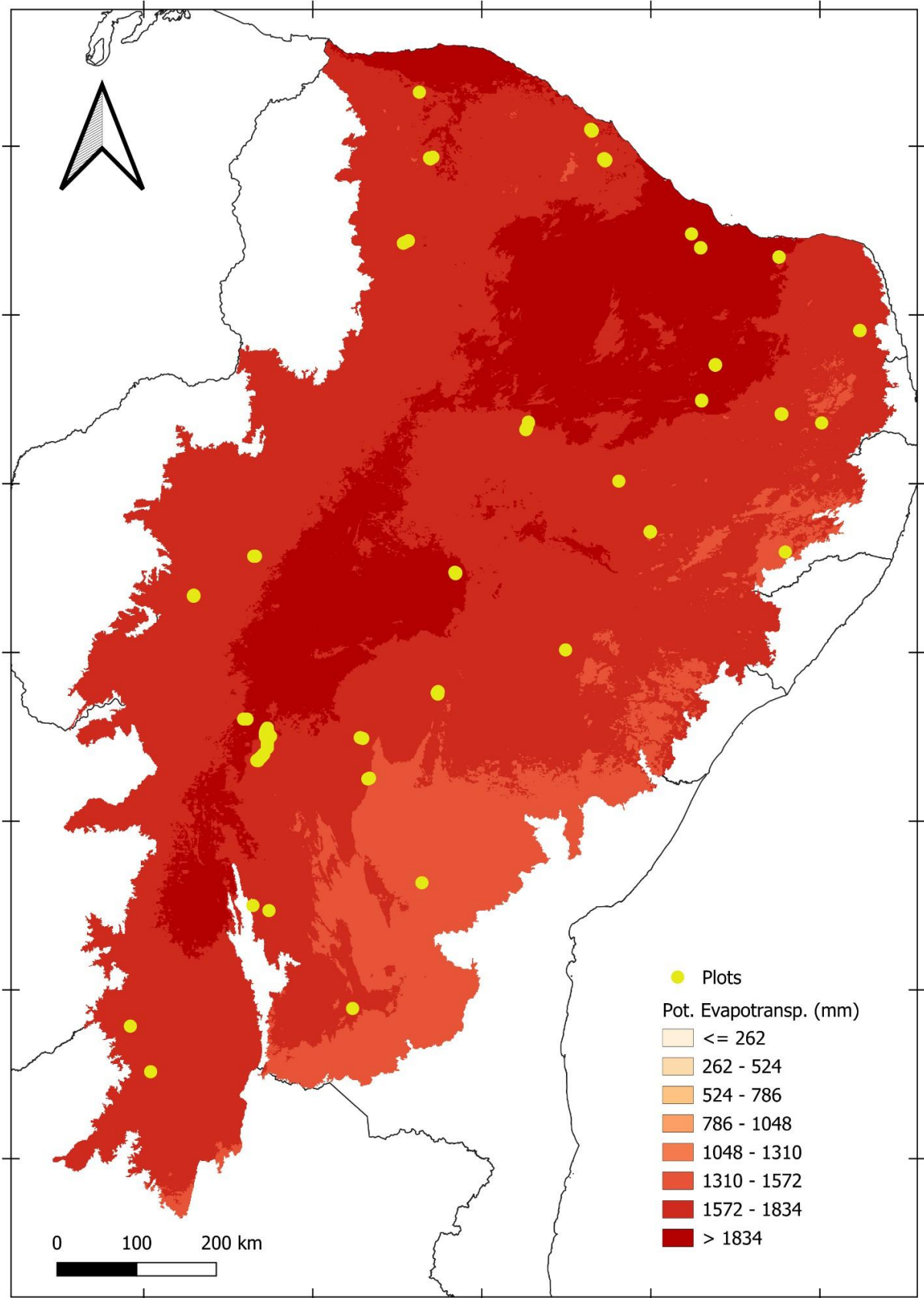
APÊNDICE C

Variável Precipitação do Período Seco em toda a extensão do bioma Caatinga.



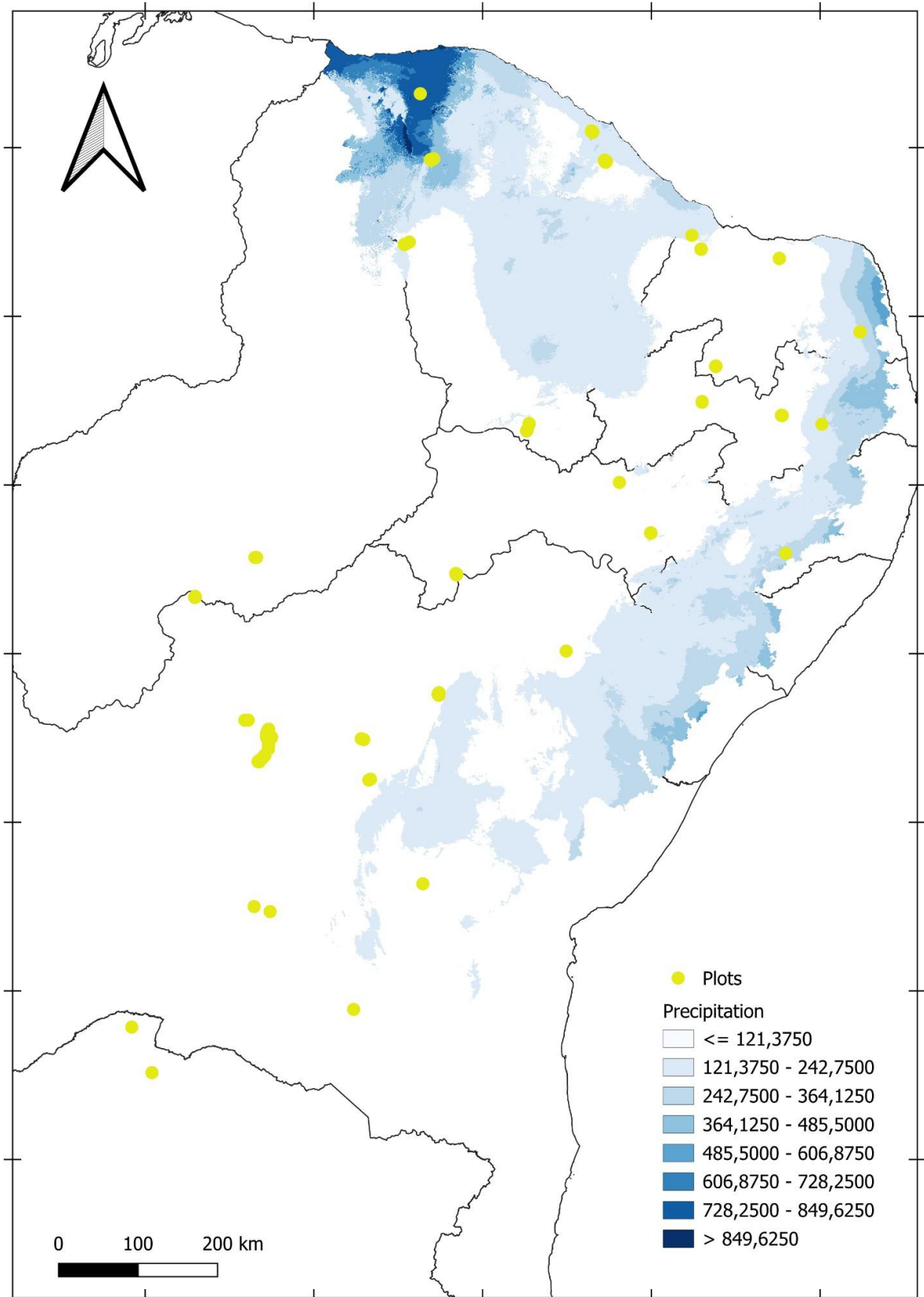
APÊNDICE D

Variável Evapotranspiração Potencial em toda a extensão do bioma Caatinga.



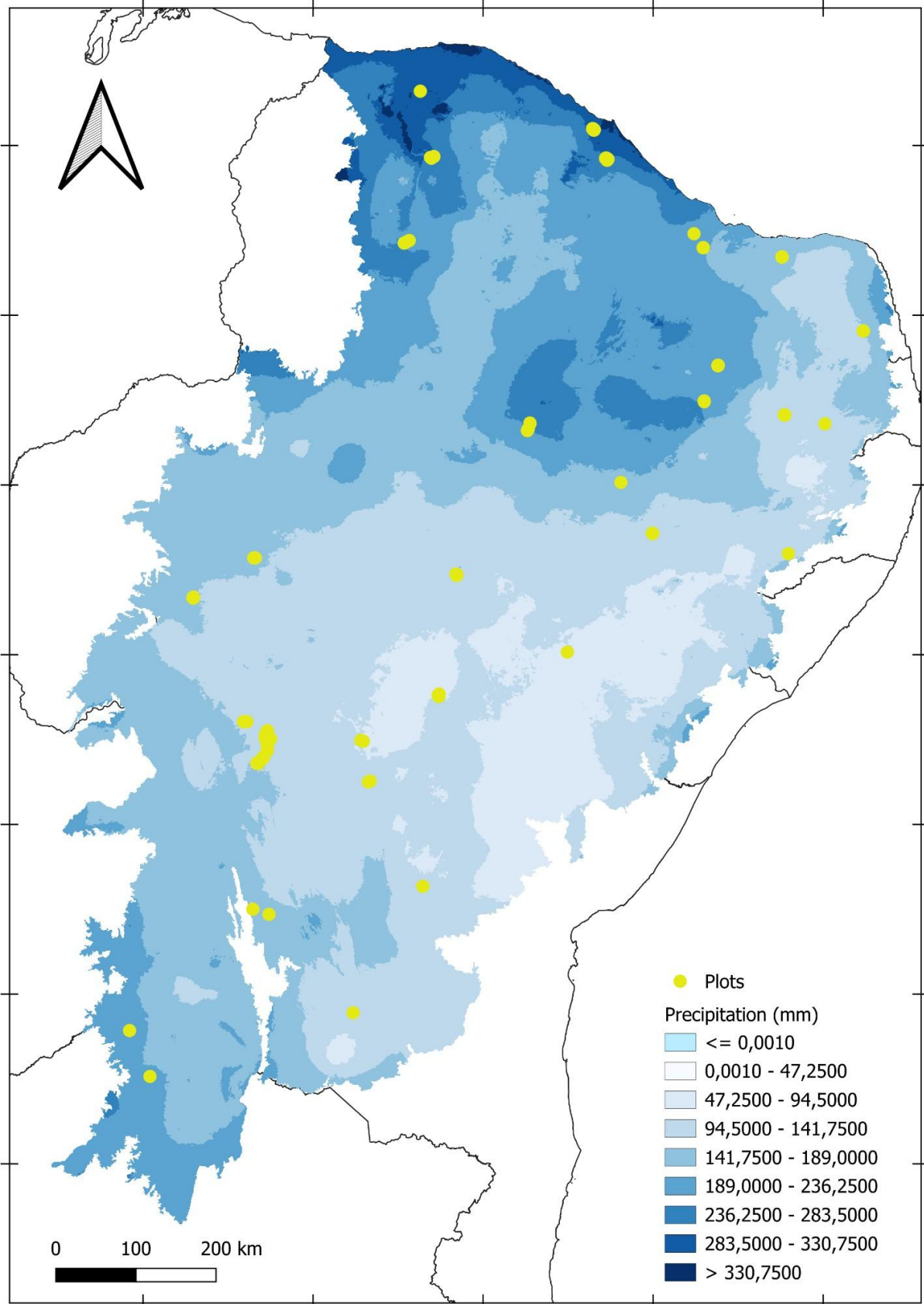
APÊNDICE E

Variável Precipitação do Quadrimestre mais Frio em toda a extensão do bioma Caatinga.



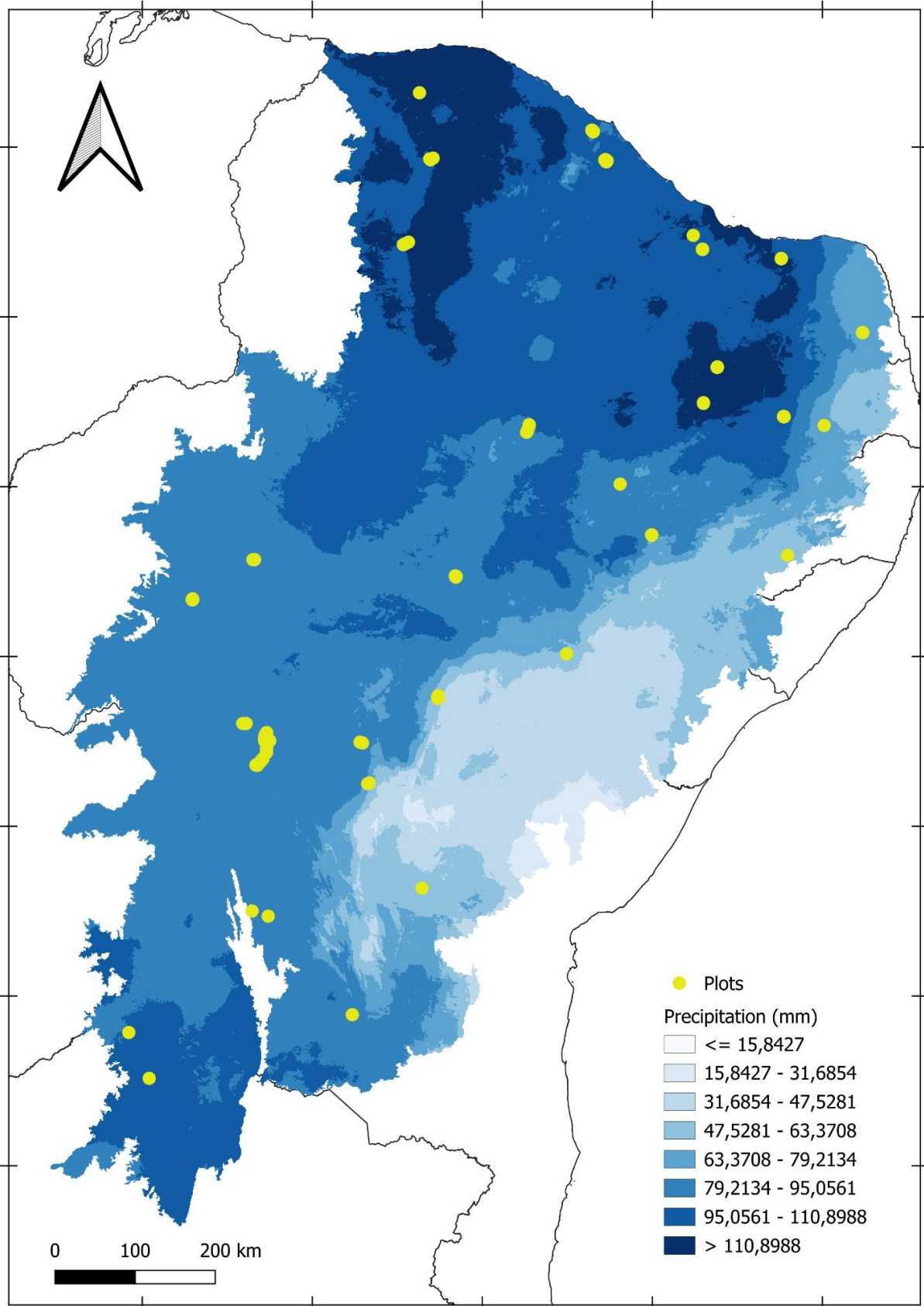
APÊNDICE F

Variável Precipitação do Mês mais úmido em toda a extensão do bioma Caatinga.



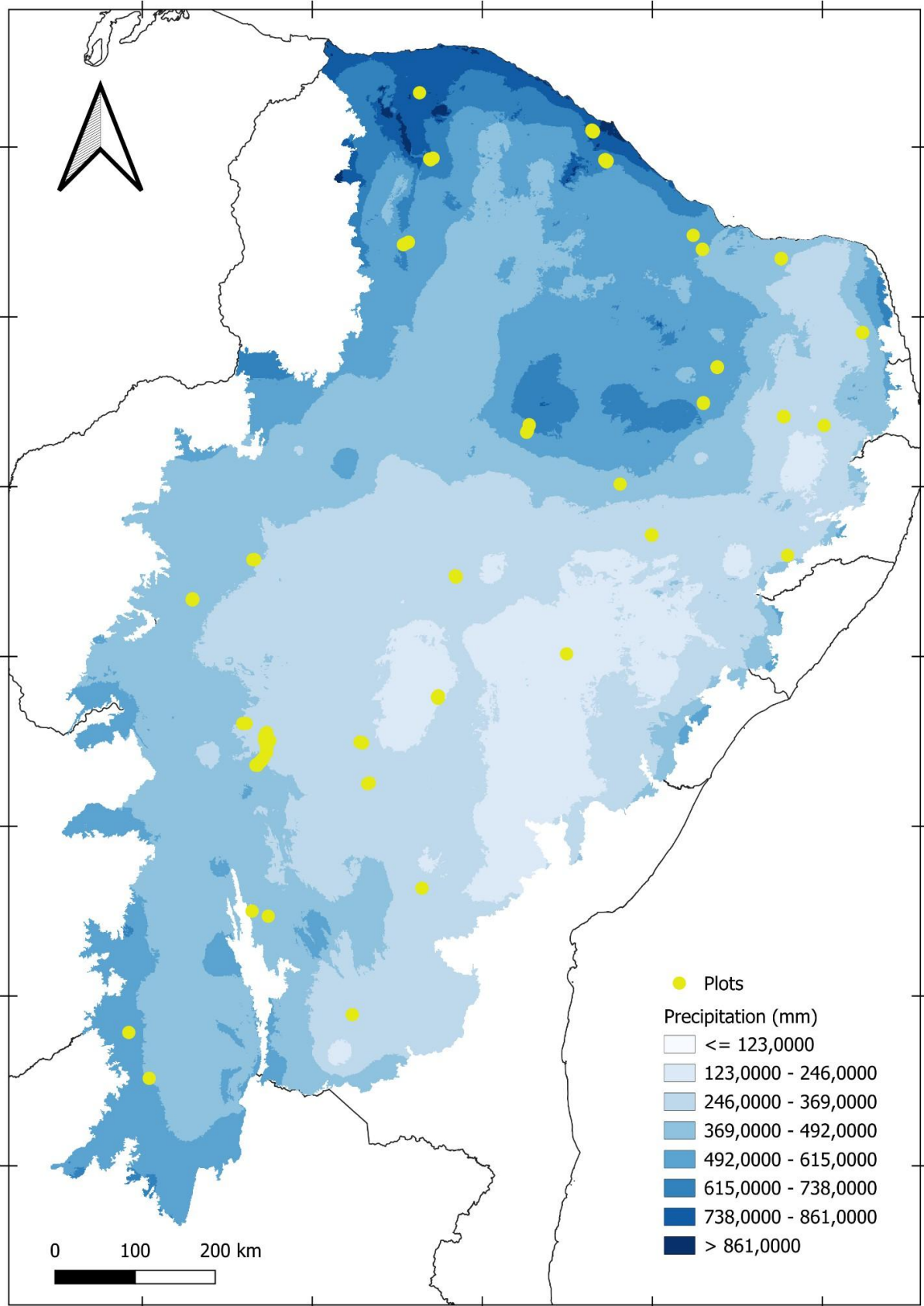
APÊNDICE G

Variável Sazonalidade da Precipitação em toda a extensão do bioma Caatinga.



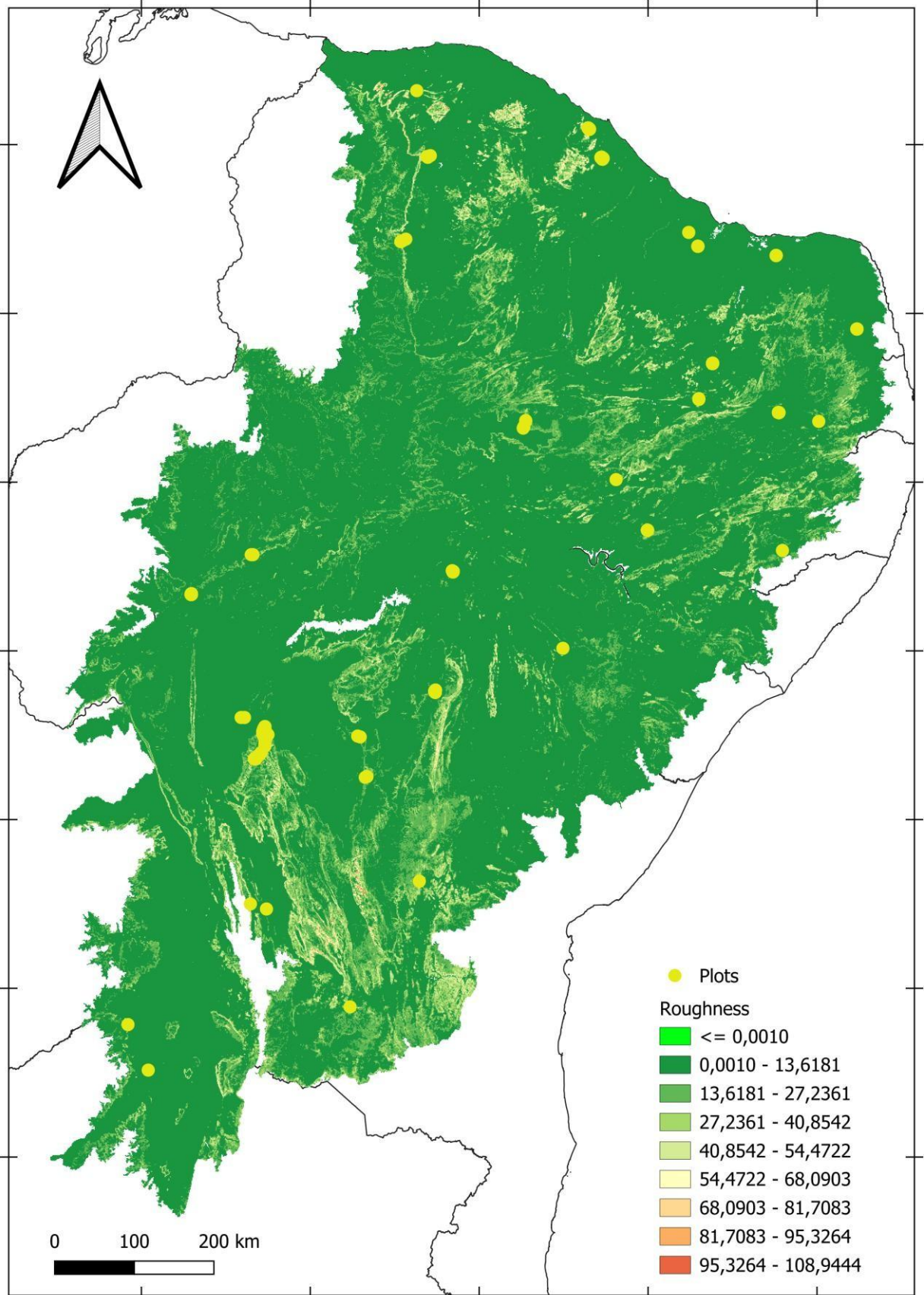
APÊNDICE H

Variável Precipitação no Período Chuvoso em toda a extensão do bioma Caatinga.



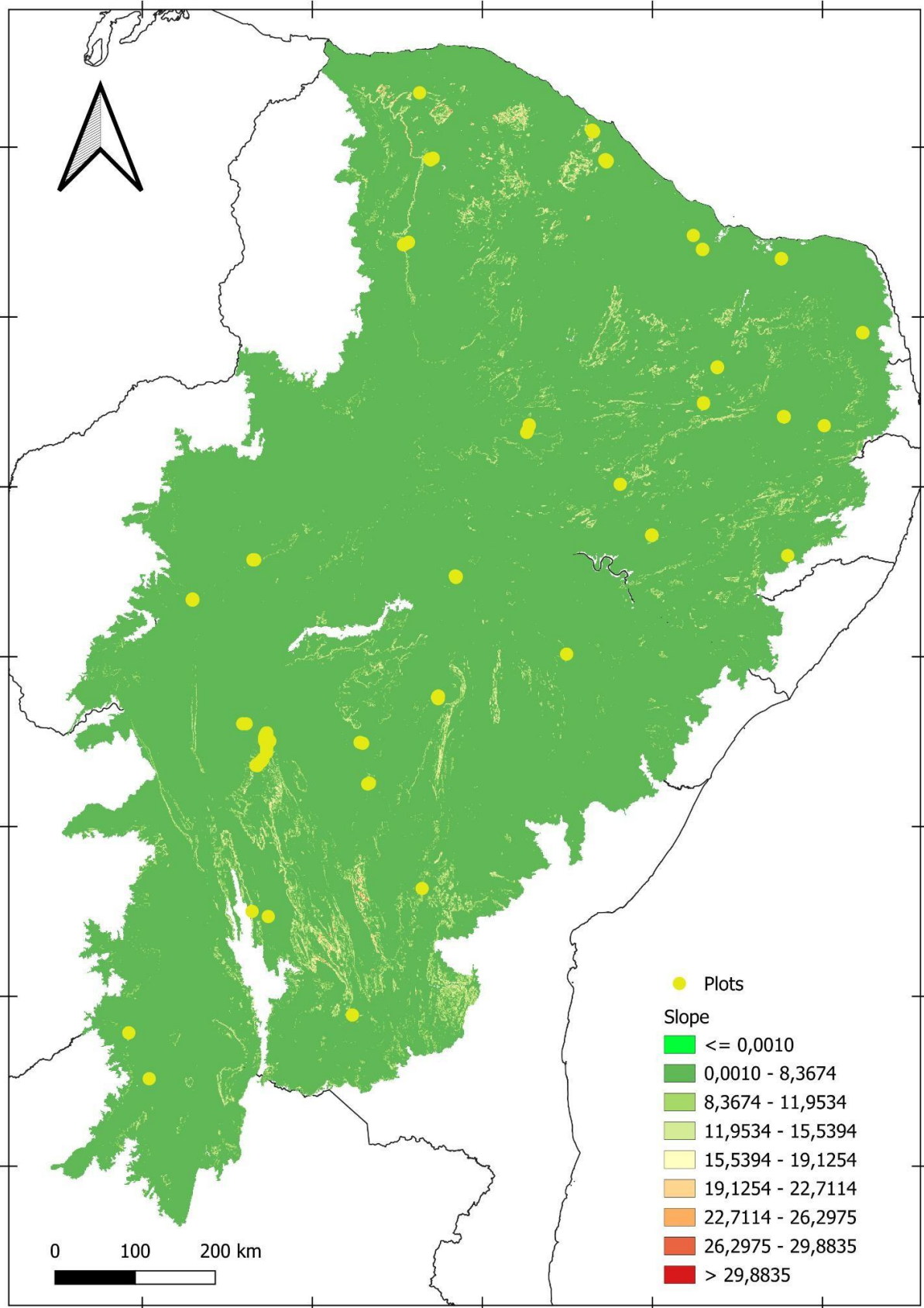
APÊNDICE I

Variável Rugosidade em toda a extensão do bioma Caatinga.



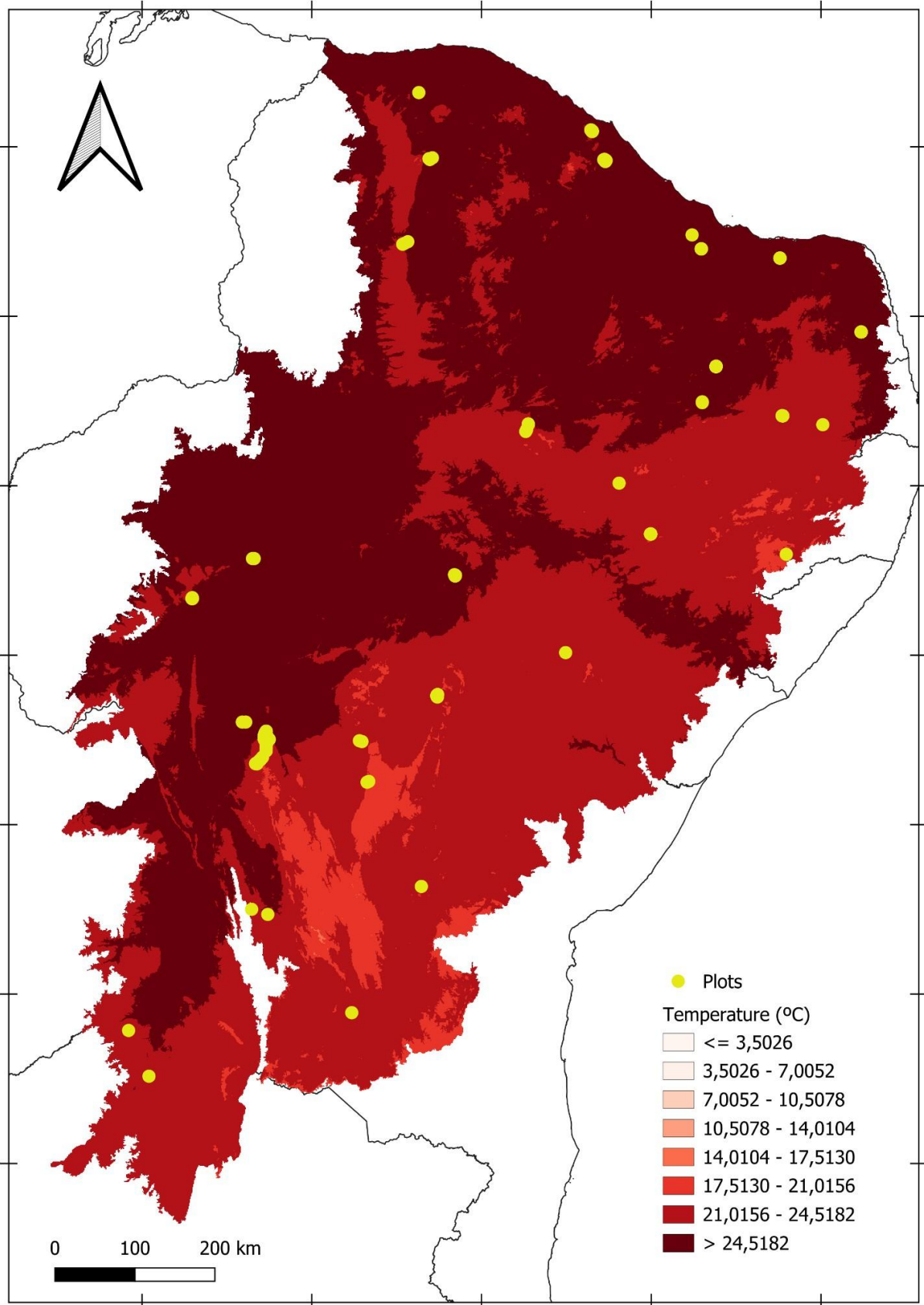
APÊNDICE J

Variável Inclinação em toda a extensão do bioma Caatinga.



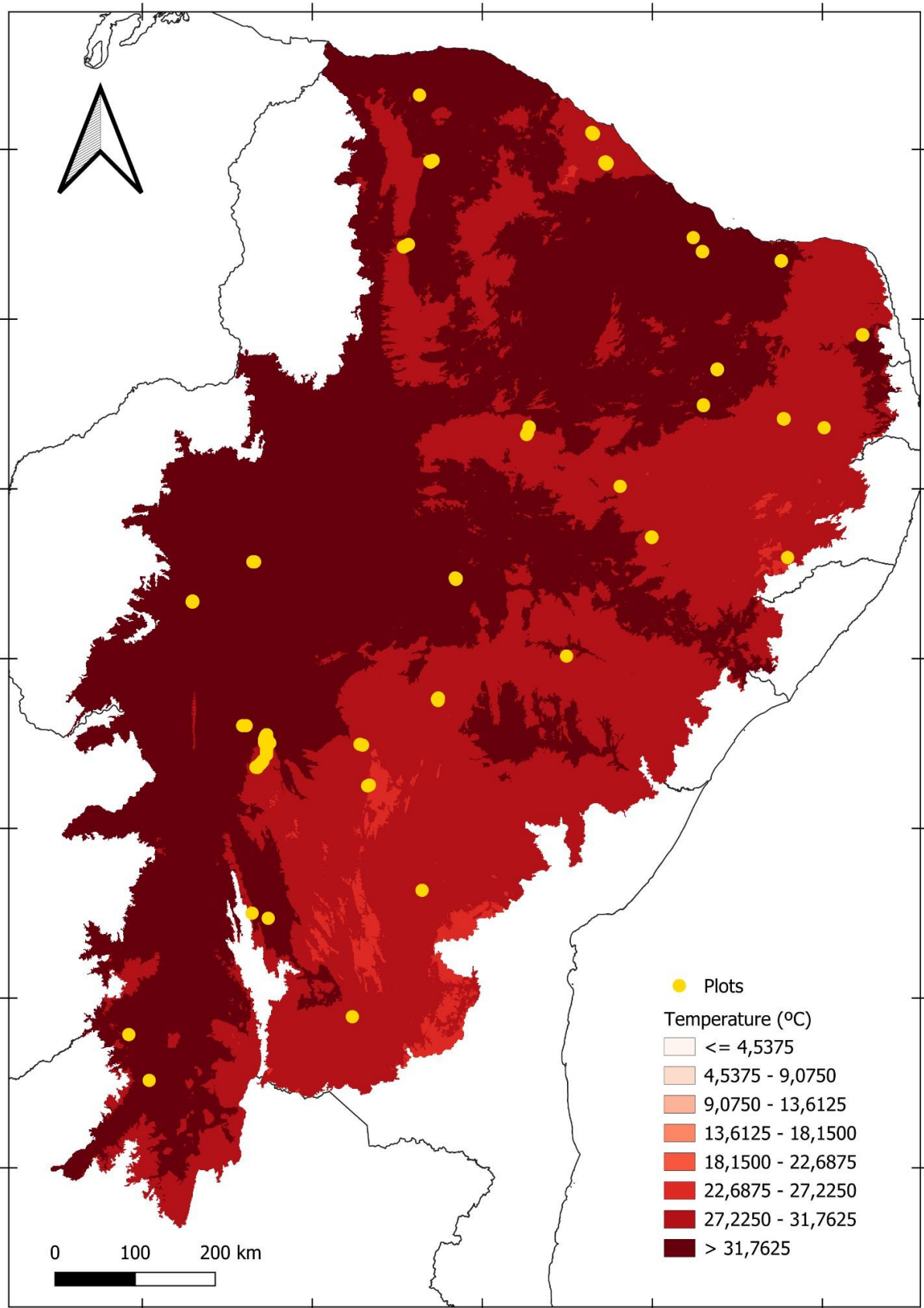
APÊNDICE K

Variável Temperatura Anual em toda a extensão do bioma Caatinga.



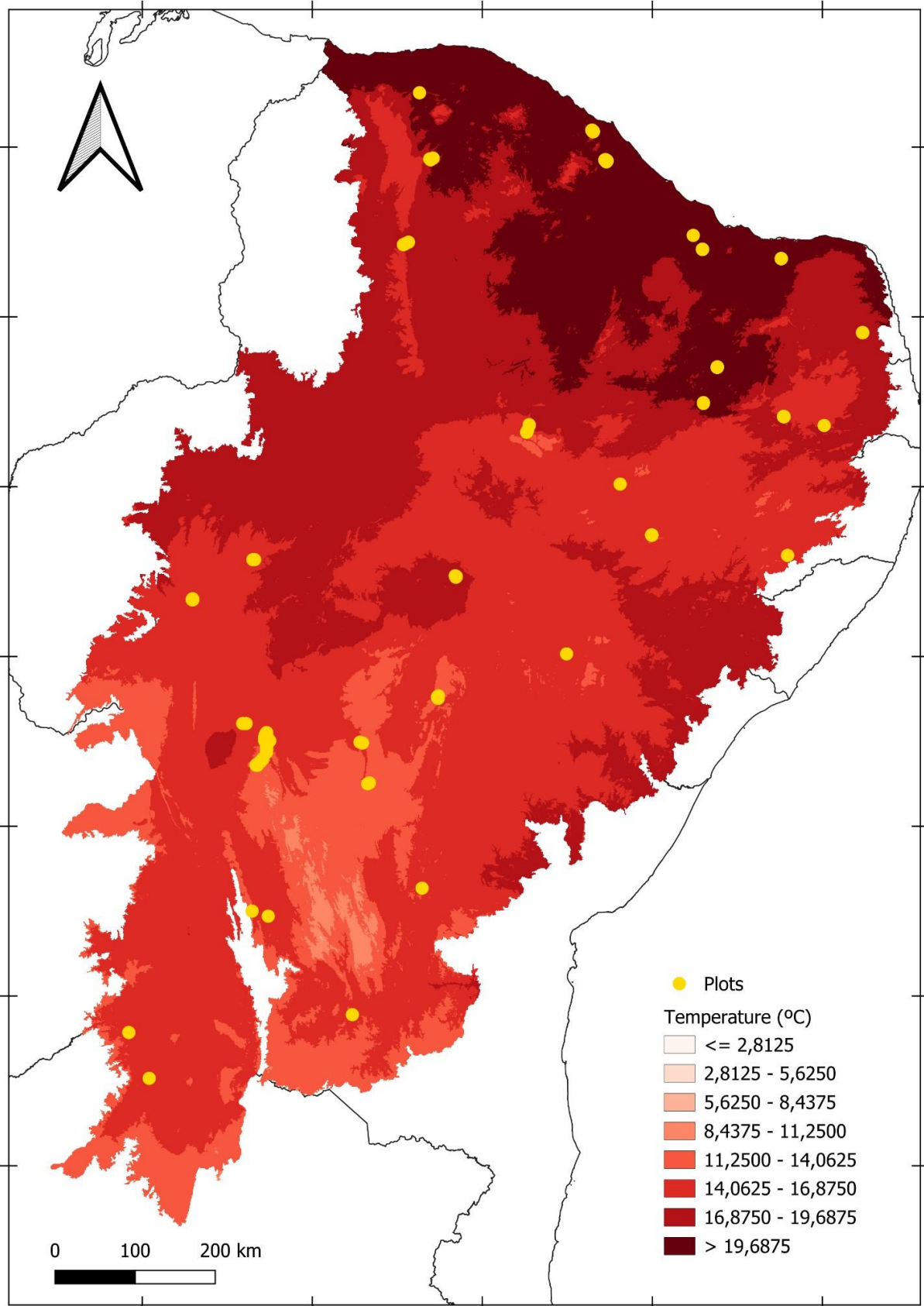
APÊNDICE L

Variável Temperatura Máxima em toda a extensão do bioma Caatinga.



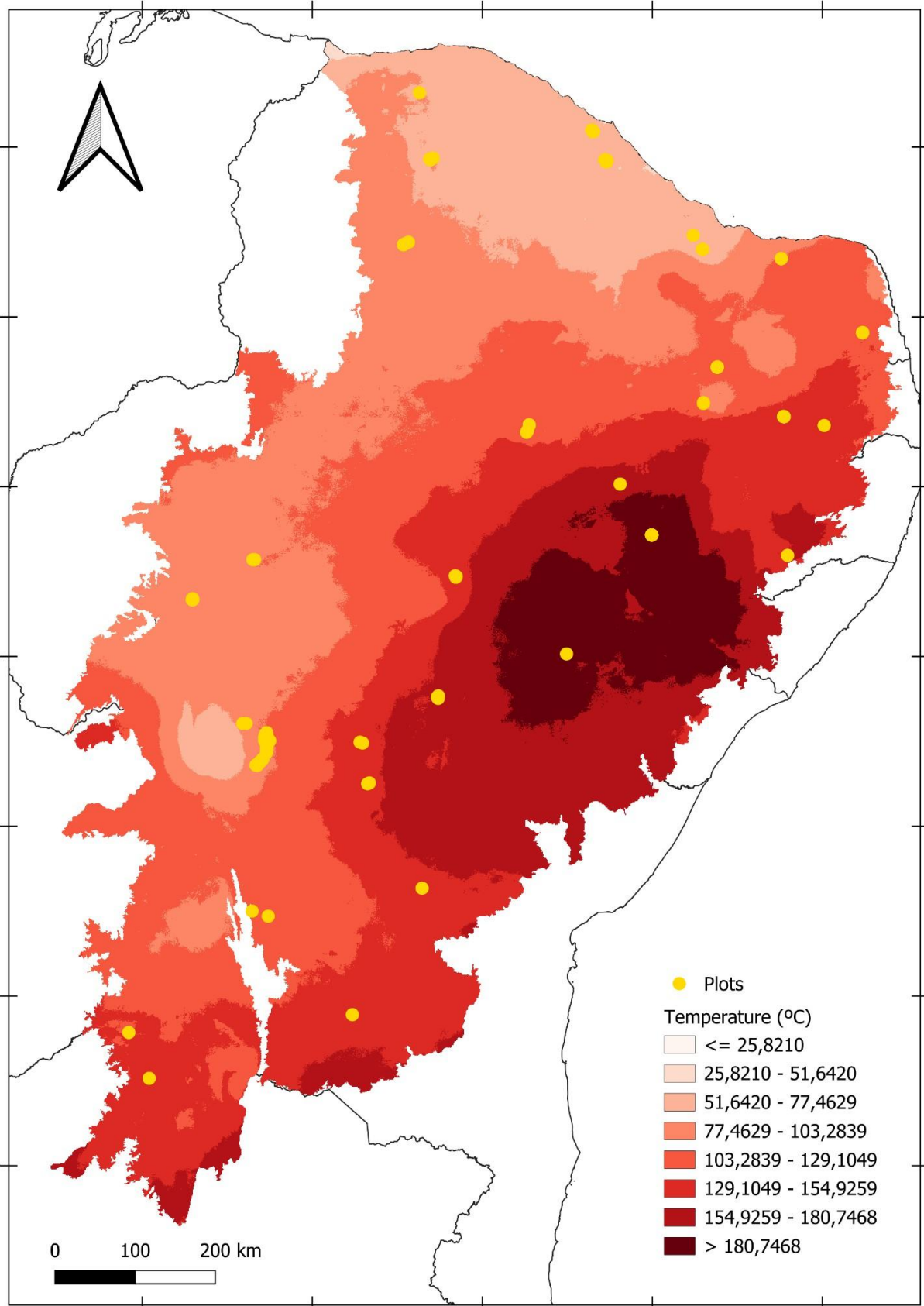
APÊNDICE M

Variável Temperatura Mínima em toda a extensão do bioma Caatinga.



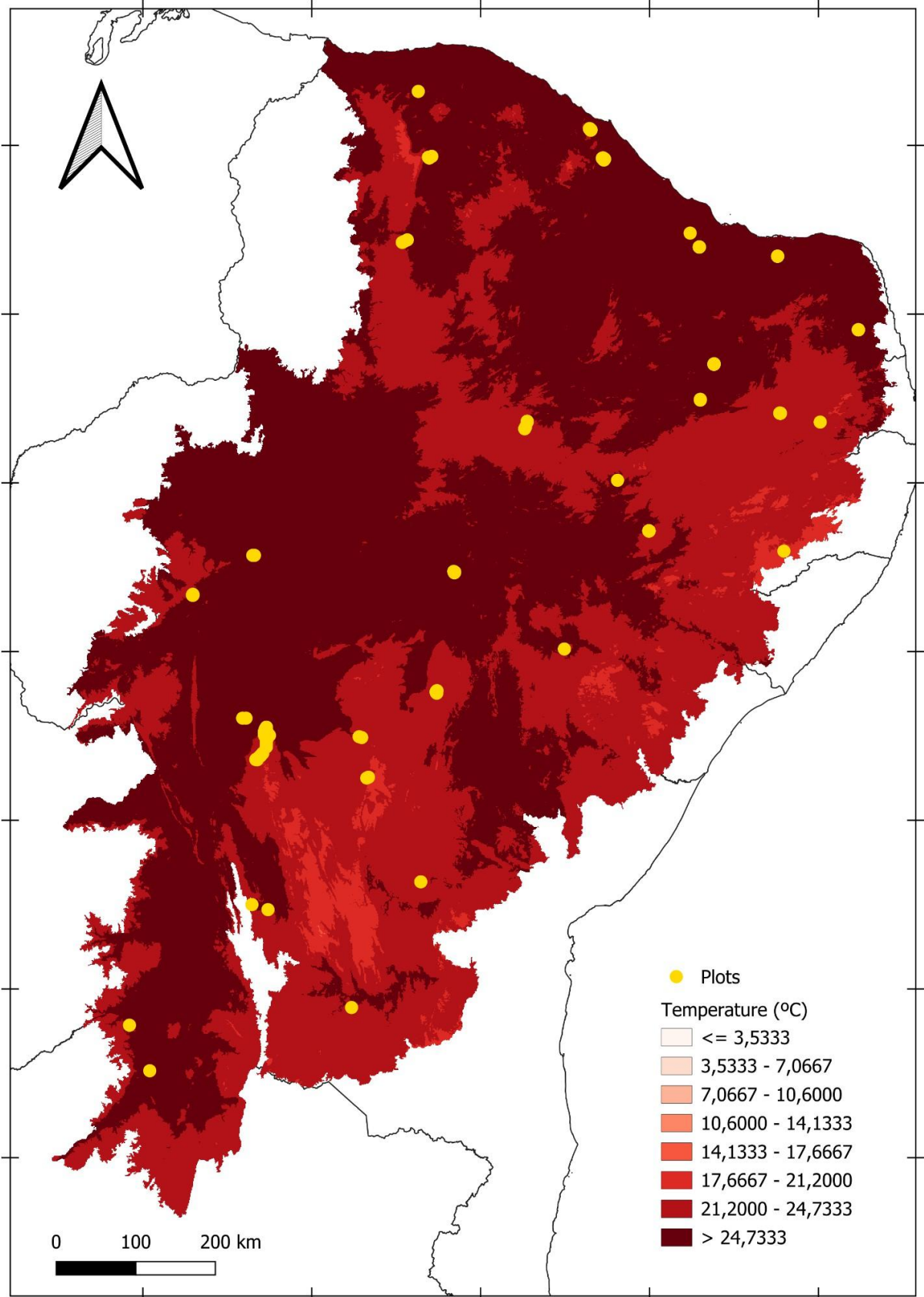
APÊNDICE N

Variável Sazonalidade da Temperatura em toda a extensão do bioma Caatinga.



APÊNDICE O

Variável Temperatura no Período mais úmido em toda a extensão do bioma Caatinga.



8. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. G. D.; CAVALCANTE, A. D. M. B.; SILVA, E. M. D. Impactos das mudanças climáticas no bioma Caatinga na percepção dos professores da rede pública municipal de General Sampaio-Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 35, 397-405, 2020.

ALVARADO, S.T.; SILVA, T.S.F.; ARCHIBALD, S. Management impacts on fire occurrence: A comparison of fire regimes of African and South American tropical savannas in different protected areas. **Environmental Management**, v. 218, p. 79–87, 2018.

ALVES, A.R.; FERREIRA, R.L.C. SILVA, J.A.A.; DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SALAMI, G. Nutrientes na biomassa aérea e na serapilheira em áreas de caatinga em Floresta, PE. **Pesquisa florestal brasileira**, v. 37, n. 92, p. 413-420, 2017.

ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. J. S.; PALÁCIO, H. A. Q.; CAMPOS, D. A. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, p. 100649, 2020.

ANDRADE, M. C. D. Geografia de Pernambuco: Ambiente e sociedade. João Pessoa–PB. **Grafset**, p. 35, 2009.

ARCHER, S. R.; ANDERSEN, E. M.; PREDICK, K. I.; SCHWINNING, S.; STEIDL, R. J.; WOODS, S. R. Woody plant encroachment: causes and consequences. In: **RANGELAND SYSTEMS**. Springer, Cham, 2017. p. 25–84.

AZEVEDO, A.D.; FRANCELINO, M.R.; CAMARA, R.; PEREIRA, M.G.; LELES, P.S.S. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. **Floresta**, v. 48, n. 2, p. 183-194, 2018.

BARBOSA, T. A.; GOMES FILHO, R. R. Biodiversidade e conservação da Caatinga: revisão sistemática. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 7, n. 4, p. 177-189, 2022.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. DO; SILVA FILHO, D. F. DA. Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

BARNI, P.E.; MANZI, A.O.; CONDÉ, T.M.; BARBOSA, R.I.; FEARNSIDE, P.M. Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 377, p. 170-181, 2016.

BARROSO, G. M. Sistemática das angiospermas do Brasil. Viçosa: UFV - **Ciências Biológicas**, v. 5, n. 1, p. 20-28, 1992.

BERNARDES, Nilo. As caatingas. **Estudos Avançados**, São Paulo, Brasil, v. 13, n. 36, p. 69–78, 1999.

BRASIL. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 6 de maio de 2025. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 25 maio 2012.

BRASIL DE FATO. Caatinga: o trunfo brasileiro no combate às mudanças climáticas. *Brasil de Fato*, São Paulo, 20 mar. 2023. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2023/03/20/caatinga-o-trunfo-brasileiro-no-combate-as-mudancas-climaticas>. Acesso em: 6 maio 2025.

BUNDY, R. A. ESRI: **Community Map of the University of Redlands**. 2012.

CAI, L.; KREFT, H.; TAYLOR, A.; DENELLE, P.; SCHRADER, J.; ESSL, F.; VAN KLEUNEN, M.; PERGL, J.; PYŠEK, P.; STEIN, A.; WINTER, M.; BARCELONA, J.; FUENTES, N.; KARGER, D. N.; KARTESZ, J.; KUPRIJANOV, A.; NISHINO, M.; NICKRENT, D.; WEIGELT, P. Machine learning improves global models of plant diversity. *BioRxiv*, v. 8, n. 487610, p. 2022.04, 2022.

CAMARGO, E.C.G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. Orgs. Geoprocessamento para projetos ambientais. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 1998.

CASTANHO, A. D. A., COE, M., BRANDO, P., MACEDO, M., BACCINI, A., WALKER, W., ANDRADE, E. M. Potential shifts in the aboveground biomass and physiognomy of a seasonally dry tropical forest in a changing climate. *Environmental Research Letters*, v. 15, p. 034-053, 2020.

CHASE, M. W., CHRISTENHUSZ, M. J. M., FAY, M. F., BYNG, J. W., JUDD, W. S., SOLTIS, D. E., STEVENS, P. F. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, v. 181, n. 1, p. 1-20, 2016.

CHEN, D.; PEREIRA, J. M.; MASIERO, A.; PIROTTI, F. Mapping fire regimes in China using MODIS active fire and burned area data. *Applied Geography*, v. 85, p. 14–26, 2017.

COIMBRA LIMEIRA, M. M.; DA SILVA BARBOSA, R. S. B.; GANASSOLI NETO, E.; BUENO COELHO, M. C.; ANTÔNIO VARAVALLLO, M. A. V.; BARILLI, J.; CARDOSO SILVA, M. V.; LUIZ ERPEN, M. Carbono, peso e volume de necromassa lenhosa em área de plano de manejo florestal. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, [S. l.], v. 17, n. 41, p. 58–67, 2020. DOI: 10.18845/rfmkv17i41.5285. Disponível em: <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/5285>. Acesso em: 10 de abril de 2025.

CONAMA. Conama aprova proposta de resolução do Ibama sobre manejo florestal sustentável da Caatinga. *Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis*, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2024/conama-aprova-proposta-de-resolucao-do-ibama-sobre-manejo-florestal-sustentavel-da-caatinga>. Acesso em: 6 maio 2025.

CORONA-NÚÑEZ, R. O., CAMPO, J., & WILLIAMS, M. (2018). Aboveground carbon storage in tropical dry forest plots in Oaxaca, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 409, 202–214. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2017.11.014>

COSTA, K. C. P., FERRAZ, J. B. S., BASTOS, R. P., FERREIRA, M. J., REIS, T. D. S., TRINDADE, A. S., GUIMARÃES, G. P. (2014). Estoques de biomassa e nutrientes em três espécies de *Parkia* em plantios jovens sobre área degradada na Amazônia Central. *Floresta*, 44(4).

CROWTHER, T. W.; GLICK, H. B.; COVEY, K. R.; BETTIGOLE, C.; MAYNARD, D. S.; THOMAS, S. M.; SMITH, J. R.; HINTLER, G.; DUGUID, M. C.; AMATULLI, G.; TUANMU, M. N.; JETZ, W.; SALAS, C.; STAM, C.; PIOTTO, D.; TAVANI, R.; GREEN, S.; BRUCE, G.; WILLIAMS, S. J.; WISER, S. K.; HUBER, M. O.; HENGEVELD, G. M.; NABUURS, G. J.; TIKHONOVA, E.; BORCHARDT, P.; LI, C. F.; POWRIE, L. W.; FISCHER, M.; HEMP, A.; HOMEIER, J.; CHO, P.; VIBRANS, A. C.; UMUNAY, P. M.; PIAO, S. L.; ROWE, C. W.; ASHTON, M. S.; CRANE, P. R.; BRADFORD, M. A. Mapping tree density at a global scale. *Nature*, v. 525, p. 201–205, 2015.

CUTLER, D. R.; WIENER, J. R. RandomForest: A package for classification and regression. R package version, 2022.

DANTAS, A. A. A.; OLIVEIRA, B. B.; SILVA, C. C.; SANTOS, D. D.; PEREIRA, E. E.; LIMA, F. F.; REIS, G. G.; COSTA, H. H.; ROCHA, I. I.; SOUZA, J. J.; ALVES, K. K.; MEDEIROS, L. L.; OLIVEIRA, M. M.; SILVA, N. N.; RODRIGUES, O. O.; PEREIRA, P. P.; TEIXEIRA, Q. Q. Relações entre variáveis climáticas e biomassa florestal na Caatinga. *Revista Árvore*, v. 46, e4605, 2022.

DAUBENMIRE, R. Plants and environment: a textbook of plant autecology. 3. ed. New York: John Wiley e Sons, 1974.

DE LIMA MARQUES, A.; DE FARIAS SOUSA, G.; MOURA, D. C.; MACEDO, R. S.; DA COSTA, C. R. G. Solo-paisagem no “Pico do Jabre (PB). *Holos Environment*, 21(2), 303-320, 2021.

DE OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. D. S.; CORREIA, M. D. F.; DE MOURA, M. S. B.; MAGNA SOELMA BESERRA, D. M. (2006). Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro, 2006.

DA SILVA GOMES, D.; DOS SANTOS, S. K.; SILVA, J. H. C. S.; DE MEDEIROS, T.; SANTOS, E. D. V. S.; DA SILVA BARBOSA, A. CO² flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 04, p. 1898-1908, 2021.

DA SILVA, J. M. C., LEAL, I. R., & TABARELLI, M. (Eds.). *Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America*. Springer, 2018.

DE FARIAS, D. T.; DA SILVA BARRETO, F. R.; DE MIRANDA SOUZA, M. R.; DA SILVA, C. J. Serapilheira em fragmento florestal de caatinga arbustivo-arbórea

fechada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 2, p. 331-337, 2019.

DEL CAMPO, A. D., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., ILSTEDT, U., BARGUÉS-TOBELLA, A., & FERRAZ, S. (2019). Dryland forests and agrosilvopastoral systems: water at the core. *Unasylva*, 70(251), 27-35.

DE SÁ, A. A.; DE CARVALHO SOUSA, C. R. Biodiversidade e Conservação da Caatinga: Um Desafio para a Ciência. *Revista Contemporânea*, 4(12), e7136-e7136, 2024.

ELOY, Elder. Produção de biomassa florestal em plantios de curta rotação. Open Science Research III. Guaruja, 2022.

EMBRAPA. Em quase uma década, Caatinga retira da atmosfera 5,2 t de carbono por hectare. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/88549836>. Acesso em: 7 maio 2025.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021.

FAPESP. Ação humana transformou 89% da Caatinga. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, 14 out. 2022. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/acao-humana-transformou-89-da-caatinga>. Acesso em: 6 maio 2025.

FARIA, O. C. O.; TORRES, G. N.; DI RAIMO, L. A. D. L.; COUTO, E. G. Estimativa do estoque de carbono no solo via espectroscopia de reflectância difusa (vis/nir) sensoriamento remoto aéreo e orbital. *Revista Caatinga*, 36(3), 675-689, 2023.

FERNANDES, M.F; QUEIROZ, L.P. Vegetação e flora da Caatinga. *Ciência e cultura*, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.

FLORA DO BRASIL. Lista de espécies da flora do Brasil. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>.

FUNDAJ – FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO. *Atlas Digital da Caatinga: biodiversidade e conservação*. Recife: Fundaj, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/composicao/dipes-1/publicacoes/livro-atlas-final.pdf>. Acesso em: 7 maio 2025.

GALILEU. Mudanças climáticas podem afetar 40% da biodiversidade da Caatinga até 2060. *Revista Galileu*, São Paulo, 5 jul. 2023. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/ciencia/meio-ambiente/noticia/2023/07/mudancas-climaticas-podem-afetar-40percent-da-biodiversidade-da-caatinga-ate-2060.ghtml>. Acesso em: 7 maio 2025.

GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, M. DE F. DE A.V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. DE A. E L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1283-1296, 2008.

GANEM, K. A.; DUTRA, A. C.; DE OLIVEIRA, M. T.; DE FREITAS, R. M.; CRISTINA, R. Mapeamento da Vegetação da Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra-Oportunidades e Desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 829-854, 2020.

GANEM, R. S. Caatinga: estratégias de conservação. Brasília: Câmara dos Deputados, **Consultoria Legislativa**, p. 105, 2017.

GARIGLIO, M.; BARCELLOS, N. D. E. Manejo sustentável em assentamentos rurais na Caatinga – Estudo de caso na Paraíba e Pernambuco. *Uso Sustentável*, 2013.

GASTAUER, M., SARMENTO, P.S. DE M., CALDEIRA, C.F., CASTRO, A.F., RAMOS, S.J., TREVELIN, L.C., JAFFÉ, R., ROSA, G.A., CARNEIRO, M.A.C., VALADARES, R.B. DA S., OLIVEIRA, G., SOUZA FILHO, P.W.M. Shannon tree diversity is a surrogate for mineland rehabilitation status. **Ecological Indicators**, v. 130, p. 108100, 2021.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. S. M.; GAVA, C. A. T. Carbono no sistema solo-planta no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(6), 1233-1253, 2011.

GOMES, C. S.; MAGALHÃES Jr, A. P. Aparato conceitual sobre áreas úmidas (wetlands) no Brasil: Desafios e opiniões de especialistas. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 37, n. 3, p. 484-508, 2017.

GONÇALVES, M. D. P. M.; FELICIANO, A. L. P.; DE PAULA SILVA, A.; DA SILVA, L. B.; DA SILVA, K. M.; DA SILVA JÚNIOR, F. S.; DA SILVA, M. I. O. (2020). Influência de diferentes tipos de solos da Caatinga na germinação de espécies nativas. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 1216-1226.

GRACE, J. B.; ANDERSON, T. M.; SEABLOOM, E. W.; BORER, E. T.; ADLER, P. B.; HARPOLE, W. S.; HAUNTIER, Y.; HILLEBRAND, H.; LIND, E. M.; PARYEL, M.; BAKKER, J. D.; BUCKLEY, Y. M.; GRAWLEY, M. J.; DAMSCHEN, E. I.; DAVIES, K.F.; FAY, P. A.; FIRN, J.; GRUNER, D. S.; HECTOR, A.; KNOPS, J. M. H.; MACDOUGALL, A. S.; MELBOURNE, B. A.; MORGAN, J. W.; ORROCK, J. L.; PROBER, S. M.; SMITH, M. D. Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness. **Nature**, v. 529, n. 7586, p. 390-393, 2016.

GUERINI FILHO, M.; KUPLICH, T. M.; QUADROS, F. L. F. Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 8, p. 2861–2876, 2020.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; ALEXANDRE, S. T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014.

HERRMANN, P. B.; NASCIMENTO, V. F.; DE FREITAS, M. W. D. Sensoriamento Remoto Aplicado à Análise de Fogo em Formações Campestres: Uma Revisão Sistemática. **Revista Brasileira Cartografia**, v. 74, n. 2, 2022.

HIJMANS, R. J.; ETEN, J.; SUMNER, M.; CHENG, J.; BASTON, D.; BEVAN, A.; BIVAND, R.; Busetto, L.; CANTY, M.; FASOLI, B.; FORREST, D.; GHOSH, A.; GOLICHER, D.; GRAY, J.; GREENBERG, J.A., HIEMSTRA, P., HINGEE, K., GEOSCIENCES, I. FOR M.A., KARNEY, C., MATTIUZZI, M.; MOSHER, S.; NAIMI, B.; NOWOSAD, J.; PEBESMA, E.; LAMIGUEIRO, O. P.; RACINE, E. B.; ROWLINGSON, B.; SHORTRIDGE, A.; VENABLES, B.; WUEEST, R. **Geographic data analysis and modeling**. R package version, 2021.

HOLANDA, A. C. D.; FELICIANO, A. L. P.; FREIRE, F. J.; SOUSA, F. Q. D.; FREIRE, S. R. D. O.; ALVES, A. R. Aporte de serapilheira e nutrientes em uma área de caatinga. *Ciência Florestal*, 27(2), 621-633, 2017.

KINDT, R. *BiodiversityR: a comprehensive set of tools for community ecology and suitability analysis*. R package version 2.12-3, 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=BiodiversityR>. Acesso em: 14 abr. 2025.

IBGE. *Indicadores de sustentabilidade ambiental: biodiversidade*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: metodologia de mapeamento e resultados preliminares*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa de biomas e formações vegetacionais do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. *Relatório de unidades de conservação federais*. Brasília: ICMBio, 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Genebra: IPCC, 2021.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Global warming of 1.5°C: Summary for policymakers*. Geneva: IPCC, 2018.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Refinamento de 2019 das Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa*. Genebra: IPCC, 2019.

ISPN – INSTITUTO SOCIEDADE, POPULAÇÃO E NATUREZA. Fauna e flora da Caatinga. Brasília, 2023. Disponível em: <https://ispn.org.br/biomas/caatinga/fauna-e-flora-da-caatinga>. Acesso em: 14 maio 2025.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. *Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa*, 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: 20 maio 2025.

KRAFT, N. J. B.; ADLER, P. B.; GODOY, O. E. C.; FULLER, S. J. M. Community Assembly, Coexistence and the Environmental Filtering Metaphor. **Functional Ecology**, v. 29, p. 592–599, 2015.

LAI, P.; ZHANG, M.; GE, Z.; HAO, B.; SONG, Z.; HUANG, J.; MA, M.; YANG, H.; HAN, X. Responses of seasonal indicators to extreme droughts in Southwest China. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, 2020.

LEAL, I. R., DA SILVA, J. M. C., TABARELLI, M., & LACHER JR, T. E. Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of northeastern Brazil. *Conservation biology*, 19(3), 701-706, 2005.

LIMA, J. R. D. S.; SOUZA, R. M. S.; SANTOS, E. S. D.; SOUZA, E. S. D.; OLIVEIRA, J. E. D. S.; MEDEIROS, É. V. D.; HAMMECKER, C. Impacts of land-use changes on soil respiration in the semi-arid region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, e0200092, 2020.

LIMA, L. O. **Tolerância de plantas da Caatinga com fenologia contrastante à seca**. 2025. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) — Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

LINS, R. C. Áreas de exceção do agreste de Pernambuco. **Sudene**, v. 20, 1989.

LOPEZ-GONZALEZ, G.; LEWIS, S.L.; BURKITT, M.; PHILLIPS, O.L. ForestPlots.net: a web application and research tool to manage and analyse tropical forest plot data. **Journal of Vegetation Science**, v. 22, p. 610-613, 2011.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras. Vol. 2. 4. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum**, 2009.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 1. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 1992.

LOURENÇO RODRIGUES, A.; FARINHA WATZLAWICK, L.; MARQUES GENÚ, A.; FELIPE HESS, A.; AUGUSTO EBLING, Â. Atributos de um Solo Florestal em uma Toposequência e Relações com a Comunidade Arbórea. **Floresta**, v. 46, n.2, 2016.

LUCENA, R. L.; STEINKE, E. T. Fatores geográficos e padrões de circulação atmosférica como base à compreensão do clima semiárido quente da região Nordeste.

Revista Workshop Internacional sobre Água no Semiárido Brasileiro, v. 1, p. 01-07, 2015.

MACHADO, P. L. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quim. Nova*, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A. *Dendrometria*. 2. ed. Guarapuava: Unicentro. 316p, 2009.

MAESTRE, F. T.; QUERO, J. L.; GOTELLI, N. J.; ESCUDERO, A.; OCHOA, V.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; GARCÍA-GÓMEZ, M.; BOWKER, M. A.; SOLIVERES, S.; ESCOLAR, C.; GARCÍA-PALACIOS, P.; BERDUGO, M.; VALENCIA, E.; GOZALO, B.; GALLARDO, A.; AGUILERA, L.; ARREDONDO, T.; BLONES, J.; BOEKEN, B.; ZAADY, E. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science*, v. 335, n. 6065, p. 214–218, 2012.

MAHARJAN, S. K.; STERCK, F. J.; RAES, N. E.; POORTER, L. Temperature and soils predict the distribution of plant species along the Himalayan elevational gradient. *Journal of Tropical Ecology*, v. 38, n. 2, p. 58-70, 2022.

MAPBIOMAS. Coleção 6 da série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil. São Paulo, 2020.

MAPBIOMAS. Coleção 9: mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil de 1985 a 2023. São Paulo, 2024

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Anais do fórum de iniciação científica do UNIFUNEC**, v. 1, n. 1, 2010.

MARANGON, G. P., FELKER, R. M., ZIMMERMANN, A. P. L., FERREIRA, R. L. C., DA SILVA, J. A. A. Análise de agrupamento de espécies lenhosas da Caatinga no Estado do Pernambuco. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 36(88), 347-353, 2016.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 90, p. 1973- 1985, 2017.

MARENGO, J. A.; SOUZA JUNIOR, C. **Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo, Alan, p. 101- 118, 2018.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*, 1, 385-422, 2011.

MAYES, M. T.; MUSTARD, J. F.; MELILLO, J. M. Forest cover change in Miombo Woodlands: modeling land cover of African dry tropical forests with linear spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 165, p. 203–215, 2015.

MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MEYER, H.; PEBESMA, E. Machine learning-based global maps of ecological variables. **Nature Ecology e Evolution**, v. 6, p. 915–924, 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). *Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Caatinga – PPCaatinga*. Brasília: MMA, 2022.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.1, p. 1-10, 2002.

MORAIS, Y.; GALVÍNICIO, J. D.; de MOURA, M. S. B. Sensoriamento remoto aplicado a estimativa do sequestro de carbono no Bioma Caatinga, 2018.

MORO, M. F.; NIC LUGHADHA, E.; ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A. Phytogeographical Metaanalysis of the Semiarid Caatinga Domain in Brazil. **Botanical Review**, v. 82, n. 2, p. 91–148, 2016. MORO, M. F. et al. Dinâmica ecológica da Caatinga: avanços e desafios. **Natureza e Conservação**, v. 14, n. 2, p. 45–55, 2016.

MOURA, P. M.; ALTHOFF, T. D.; OLIVEIRA, R. A.; SOUTO, J. S.; SOUTO, P. C.; MENEZES, R. S.; SAMPAIO, E. V. Carbon and nutrient fluxes through litterfall at four succession stages of Caatinga dry forest in Northeastern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 105, n. 1, p. 25-38, 2016.

NAZAR, T. I. S. M.; RODRIGUES, S. C. Relevô do Chapadão do Diamante, Serra da Canastra/MG, Brasil: compartimentação e análise a partir dos aspectos geomorfométricos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 1, 2019.

NUNES, A. L. D. S. L. Estrutura e dinâmica do componente arbustivo-arbóreo em uma área de Caatinga sob diferentes sistemas silviculturais, em Macau, RN, 2022.

NUNES, Y. R. F.; SILVA, E. N.; LIMA, J. E. R.; OLIVEIRA, M. C. Modelagem da biomassa florestal na Caatinga usando sensores remotos e dados de campo. **Revista Floresta**, v. 52, n. 1, p. 23–34, 2022.

OKSANEN, J.; SIMPSON, G. L.; BLANCHET, F. G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MINCHIN, P. R.; O'HARA, R. B.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M. H. H.; SZOECS, E.; WAGNER, H.; BARBOUR, M.; BEDWARD, M.; BOLKER, B.; BORCARD, D.; CARVALHO, G.; CHIRICO, M.; CACERES, M. D.; DURAND, S.; EVANGELISTA, H. B. A.; FITZJOHN, R.; FRIENDLY, M.; FURNEAUX, B.; HANNIGAN, G.; HILL, M. O.; LAHTI, L.; MCGLINN, D.; OUELLETTE, M. H.; CUNHA, E. R.; SMITH, T.; STIER, A.; BRAAK, C. J. F. T.; WEEDON, J. **vegan: Community Ecology Package**. R package version 2.6-4, 2022. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. Acesso em: 20 abr. 2025.

O'DONNELL, M. S.; IGNIZIO, D. A. *Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States*. U.S. Geological Survey Data Series 691, 2012. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/ds/691/>. Acesso em: 25 maio. 2025.

OLIVEIRA, A. F.; SILVA, R. L.; ANDRADE, F. P. C.; MARTINS, A. L. Estimativas de biomassa e carbono em sistemas semiáridos. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 3, p. 694–704, 2021.

PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H. A.; GIOVANNETTONE, J.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; KUMAR-THAKUR, M.; BURITI, Catarina de Oliveira. Long-Term Spatiotemporal Variation of Droughts in the Amazon River Basin. In: *Water*, v. 13, p. 351-366, 2021.

PEREIRA, M. D. B. **Dinâmica climática e as chuvas na região da Zona da Mata, Nordeste do Brasil**. 2018. 208 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) -Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

PEREIRA, A. L. L. **Predição Espacial da Diversidade Potencial da Espécie Arbórea na Caatinga**. 2024. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2024.

PESCADOR, D. S.; BELLO, F.; VALLADARES, F.; ESCUDERO, A. Plant Trait Variation along the Altitudinal Gradient in Mediterranean High Mountain Grasslands: Controlling the Species Turnover Effect. **PLoS ONE**, v. 10, p. 1–16, 2015.

PINTO, C. B.; SANQUETTA, C. R.; LIMA, M. R. D. Estoques de carbono em área florestal nativa e em processo de recuperação após mineração, Rio Branco do Sul-PR, 2012.

QI, M.; LIU, S.; YAO, X.; XIE, F.; GAO, Y. Monitoring the ice phenology of Qinghai lake from 1980 to 2018 using multisource remote sensing data and Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 14, 2020.

QUEIROZ, L. P. D. **Leguminosas da caatinga**. Universidad Estadual de Feira de Santana, 2009.

RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais**. Aracaju - Recife. v. 30, p. 24-25, 1983.

RAMOS, G. G.; ALVES, J. B.; DE ARAÚJO, M. D. F.; FERREIRA, V. S. G.; PINTO, M. G. C.; DE HOLANDA LEITE, M. J.; VASCONCELOS, A. D. M.; RIBEIRO, I. R. Levantamento dos impactos ambientais de um trecho de mata ciliar em região de Caatinga no sertão paraibano. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 52848-52859, 2020.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

REDO, D.; AIDE, T. M.; CLARK, M. L. Vegetation change in Brazil's dryland ecoregions and the relationship to crop production and environmental factors: Cerrado, Caatinga, and Mato Grosso, 2001–2009. **Journal of Land Use Science**, v. 8, n. 2, p.123-153, 2013.

REYNOLDS, J. F.; STAFFORD-SMITH, D. M.; LAMBIN, E. F.; TURNER II, B. L.; MORTIMORE, M. J.; BATTERBURY, S. P. J.; DOWNING, T. E.; DOWLATABADI, H.; FERNANDEZ, R. J.; HERRICK, J. E.; HUBER-SANNWALD, E.; JIANG, H.; LEEMANS, R.; LYNAM, T.; MAESTRE, F. T.; WALKER, B. E. AYARZA, M. Global desertification: building a science for dryland development. **Science**, v. 316, n. 5826, p. 847–851, 2007.

RIPLEY, B.; VENABLES, B.; BATES, D.; HORNIK, K.; GEBHARDT, A.; FIRTH, D.; RIPLEY, M. Package 'mass'. **R package version**, 2022.

ROCHA, K. D. **Estimação de volume de madeira por krigagem em área de Caatinga**. 2023. Estudo (Mestrado em Ciências Florestais) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: repositório da UFRPE.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, G. J. S. Equações para estimativa da fitomassa da Caatinga. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (org.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005. p. 207–215.

SANQUETTA, C. R.; PEREIRA, M. L.; SOUZA, R. F. Biomassa e carbono em florestas. **Revista Floresta**, v. 33, n. 3, p. 245–252, 2003.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; MOGNON, F.; MAAS, G. C. B.; RODRIGUES, A. L. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44, 01-08, 2014.

SANTOS, A. M. D. S.; BRUNO, R. D. L. A.; CRUZ, J. D. O.; SILVA, I. D. F. D.; ANDRADE, A. P. D. Variabilidade espacial do banco de sementes em área de Caatinga no Nordeste do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 542-555, 2020.

SANTOS, M. O.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; PAULA, A. Efeito do manejo florestal da caatinga no estoque de carbono orgânico em agregados do solo. **Scientia Forestalis**, 49(129), e3419, 2021.

SANTOS, M. V.; SILVA, L. R.; FERREIRA, R. C. Volume e carbono em fragmentos de Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 34–41, 2023.

SCHIKOWSKI, A. B.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R. (2013). Modelagem do crescimento e de biomassa individual de *Pinus*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 33(75), 269-278.

SCHULZ, K., GUSCHAL, M., KOWARIK, I., ALMEIDA-CORTEZ, J. S., SAMPAIO, E. V. S. B., & CIERJACKS, A. (2018). Grazing, forest density, and carbon storage: towards a more sustainable land use in Caatinga dry forests of Brazil. *Regional Environmental Change*, 18(7), 1969–1981. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1303-0>

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, p. 719–734, 1933.

SIDHU, N.; PEBESMA, E.; CÂMARA, G. Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case. **European Journal of Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 486–500, 2018.

SILVA, A. C. F. D., FREIRE, F. J., BORGES, C. H. A., ARAUJO, E. C. G., SANTANA, G. M.; CUNHA, E. M. D.; SANQUETTA, C. R. Teores de carbono em espécies florestais da Caatinga. **Ciência Florestal**, 32(1), 71-85, 2022.

SILVA, D. A. D. O.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LOPES, P. M. O.; SILVA, J. L. B.; SANTOS, J. E. B. D.; DA SILVA, E. M.; CESAR, D. D. N. Monitoring of degradation in the Caatinga biome in the semi-arid northeastern region, Brazil, 2020.

SILVA, J. B.; DANTAS, E. W.; CAVALCANTE, T. Geografia do Ceará: um novo olhar geográfico. Fortaleza. **Demócrito Rocha**, v. 01, p. 169-188, 2005.

SILVA, J. M. C. D.; BARBOSA, L. C. F.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. The Caatinga: understanding the challenges. **Caatinga**. Springer, Cham, p. 3-19, 2017.

SILVA, J. N. B., GALVÍNCIO, J. D., MIRANDA, R. Q., MOURA, M. S. B. Modelos da Produtividade Primária Bruta em área de floresta tropical em sazonalmente seca, usando dados reflectância da vegetação de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 14, 2021.

SILVA, T. T.; LIMA, R. B. D.; SOUZA, R. L. F. D.; MOONLIGHT, P. W.; CARDOSO, D.; SANTOS, H. K. V.; OLIVEIRA, C. P. D.; VEENENDAAL, E.; QUEIROZ, L. P.; RODRIGUES, P. M. S.; SANTOS, R. M. D.; SARKINEN, T.; DE PAULA, A.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PENNINGTON, T.; PHILLIPS, O. L. Mapping wood volume in seasonally dry vegetation of Caatinga in Bahia State, Brazil. **Scientia Agricola**, v. 80, n. 1, p. 1-10, 2023.

SILVEIRA, L. P. SANTOS, F. S.; OLIVEIRA, J. P.; ALMEIDA, R. M. Predição de atributos da madeira na Caatinga com krigagem de regressão. **Floresta e Ambiente**, v. 30, e20220037, 2023.

SILVEIRA, E.M.O.; REIS, A.A.; TERRA, M.C.N.S.; WITHEY, K.D.; MELLO, J.M.; ACERBI-JÚNIOR, F.W.; FERRAZ FILHO, A.C.; MELLO, C.R. Spatial distribution of wood volume in Brazilian savannas. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 91, n. 4, p. 1-12, 2019.

SLINGSBY, J. A.; MONCRIEFF, G. R.; WILSON, A. M. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Near-real time forecasting and change detection for an open ecosystem with complex natural dynamics. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 166, n. December 2019, p. 15–25, 2020.

SMITH, S. A.; DONOGHUE, M. J. Rates of molecular evolution are linked to life history in flowering plants. **Science**, v. 322, n. 5898, p. 86-89, 2008.

SOUZA, A. L. D., BOINA, A., SOARES, C. P. B., VITAL, B. R., GASPAR, R. D. O., & LANA, J. M. D. Estrutura fitossociológica, estoques de volume, biomassa, carbono e

dióxido de carbono em Floresta Estacional Semidecidual. **Revista Árvore**, 36, 169-179, 2012.

SOUZA, B. I. D.; ARTIGAS, R. C.; LIMA, E. R. V. D. Caatinga e desertificação. **Mercator (Fortaleza)**, 14(1), 131-150, 2015.

SOUZA, R. L.; FERREIRA, A. C.; OLIVEIRA, B. D. Variação sazonal e interanual da umidade do solo e da evapotranspiração em Caatinga. **Anais do 21º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/374409063>. Acesso em: 7 maio 2025.

SUDENE, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Semiárido. Disponível em: < https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/8-relatoriometodologia_semiarido2021_v9-versaodefinitiva_1_.pdf/view >. Acessado em: 30 abr. 2024.

SYFERT, M. M.; BRUMMITT, N. A.; COOMES, D. A.; BYSTRIAKOVA, N.; SMITH, M. J. Inferring diversity patterns along an elevation gradient from stacked SDMs: A case study on Mesoamerican ferns. **Global Ecology and Conservation**, v. 16, p. 00433, 2018.

TABARELLI, M.; LEAL, I. R.; SCARANO, F. R.; SILVA, J. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 4, p. 25-29, 2018.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; DE OLIVEIRA SANTANA, M.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018.

TROVÃO, D. M. D.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A. D.; DANTAS NETO, J. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 307-311, 2007.

VAN DEN HOOGEN, J.; ROBMANN, N.; ROUTH, D.; LAUBER, T.; VAN TIEL, N.; DANYLO, O.; CROWTHER, T. W. A geospatial mapping pipeline for ecologists (preprint). **BioRxiv**, v. 07, n. 451145, p. 2021.07, 2021.

ZHENG, C.; TANG, X.; GU, Q.; WANG, T.; WEI, J.; SONG, L.; MA, M. Climatic anomaly and its impact on vegetation phenology, carbon sequestration and water-use efficiency at a humid temperate forest. **Journal of Hydrology**, 565, 150–159, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.08.012>

YU, Z.; LU, C.; CAO, P.; TIAN, H.; HESSL, A.; PEDERSON, N. Earlier leaf-flushing suppressed ecosystem productivity by draining soil water in the Mongolian Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, 250–251, 1–8, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.11.035>

WATZLAWICK, L.F. et al. Variação dos teores de carbono orgânico em espécies arbóreas da floresta ombrófila mista. **Floresta e Ambiente**, v.18, n.3, p.248-258, 2011.