

7. A CONTRIBUIÇÃO DA CIÊNCIA AGRÍCOLA BRASILEIRA PARA OS DESAFIOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Eduardo Delgado Assad³⁹, Stoécio Maia⁴⁰, Jurandir Zullo Jr⁴¹,
Vanessa Pugliero⁴², Eduardo Pavão⁴², João Paulo Silva⁴²

INTRODUÇÃO

O setor agrícola é particularmente sensível à variabilidade e às alterações climática, sendo que a agricultura é um dos pilares da economia do Brasil. Representando cerca de 25% do PIB, constitui o suporte dos meios de subsistência e da segurança alimentar de 70-80% da população, em especial nas zonas rurais.

Portanto, é urgente uma abordagem mais ampla com as mudanças climáticas e de seus impactos na agricultura pelo potencial vulnerabilidade à variabilidade climática, especialmente na região onde os rendimentos são mais baixos, o que tem forte impacto na segurança alimentar. Com uma visão mais abrangente dos impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar, neste capítulo serão avaliadas as questões que envolvem a relação entre clima-agricultura-pecuária-economia e as implicações no Brasil, de acordo com o fluxograma abaixo (Figura 1). Este fluxograma é referente aos estudos do subcomponente segurança ali-

39 Fundação Getúlio Vargas, FGV, São Paulo, SP.

40 Instituto Federal de Alagoas, ITAL, Maceió, AL.

41 Universidade de Campinas, UNICAMP, Campinas, SP.

42 Rede Brasileira de Pesquisas em Mudanças Climáticas, Rede Clima, Campinas, SP.

Autor correspondente: eduardo.assad@faunaprojetos.com.br

mentar do projeto INCT Fase 2, financiado pela FAPESP e CNPQ. Essa avaliação faz parte de um grande esforço da rede clima do MCTI, desde o ano de 2009, onde diversas contribuições foram feitas no sentido de entender melhor o impacto das mudanças do clima na agricultura, como propor medidas de mitigação e adaptação e finalmente buscar quantificar os fatores de emissão e remoção da agricultura nos últimos anos.

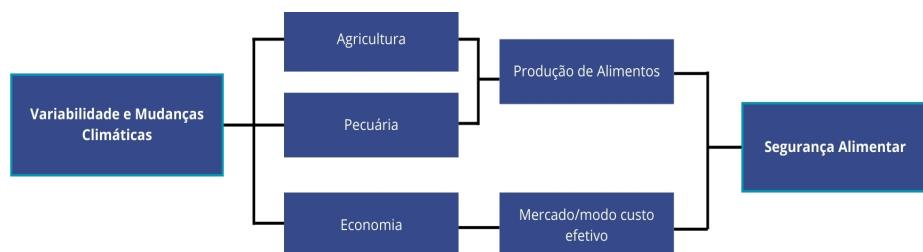


Figura 1: Fluxograma da subcomponente da segurança alimentar.

Os impactos das mudanças climáticas e suas variabilidades, com implicações na agricultura, pecuária e economia, tem estreita relação com a produção de alimentos e os mercados que o regulam. No final desse processo está então a segurança alimentar.

As questões relacionadas com a segurança alimentar e as alterações climáticas têm sido cada vez mais debatidas e analisadas por investigadores de diferentes áreas do conhecimento. Estas duas questões representam importantes desafios para a população mundial e envolvem diretamente o setor agrícola e as suas relações com outros setores econômicos. Como a demanda por produtos agrícolas crescerá com o aumento da população e da renda nas próximas décadas, ações setoriais podem contribuir significativamente para as metas internacionais de redução e estabilização das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE). Especificamente, é consenso que, por meio de uma gestão adequada e de uma agricultura regional, práticas alternativas no setor de agricultura, silvicultura e outros usos do solo (AFOLU - Agriculture, Forestry and Other Land Use) podem contribuir grandemente para mitigar as emissões de GEE.

Os sistemas produtivos baseados na intensificação sustentável da produção agrícola passam necessariamente por uma abordagem integrada entre as alterações climáticas, as ações de adaptação e a miti-

gação das emissões de GEE. A identificação de sinergias entre mitigação e adaptação no setor AFOLU é essencial, pois a segurança alimentar e os impactos das alterações climáticas no setor agrícola requerem ações integradas. O efeito combinado das estratégias de atenuação e adaptação é maior do que quando estas medidas são aplicadas individualmente. Além disso, a maioria das técnicas de mitigação atualmente utilizadas na agricultura foi originalmente concebida como “estratégias de gestão ótima”, destinadas a melhorar a estabilidade e a resiliência dos sistemas agrícolas a longo prazo, gerando cenários do tipo “win-win”. Por exemplo, no Plano ABC (2020) está previsto a expansão da área utilizada com sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em quatro milhões de hectares. O governo lançou o “Programa Nacional de Recuperação de Pastagens Degradadas” MAPA(2024) com objetivo de recuperar 40 milhões de hectares de pastos, transformando-os em sistemas produtivos. Espera-se que com essas ações, os impactos na oferta de alimentos sejam minimizados.

Esses sistemas possibilitam, entre outras consequências, a fixação de carbono e a redução de emissão de óxido nitroso e, consequentemente, a redução das emissões de GEE's. Da mesma forma, a estratégia adaptativa se configura por proporcionar maior produtividade e maior resiliência dos sistemas agrícolas, tornando os produtores menos vulneráveis às mudanças climáticas. Além do aprimoramento de aspectos técnicos e, principalmente, da aplicação de tecnologias para aumentar a produtividade dos alimentos, é necessário estimular a reflexão sobre a contribuição da agricultura familiar para garantir a segurança alimentar em escala global, assim como investigar quais são os desafios no Brasil para a segurança alimentar. Para tanto, é necessário fazer valer a inserção do tema na agenda política das organizações de agricultores familiares no Brasil (CONTAG 2024) por meio da análise dos resultados das políticas e programas que visam aproximar produtores e consumidores no país. Além disso, investigar os conflitos entre a agricultura familiar e as variações de preços no mercado pode contribuir para reduzir a vulnerabilidade dos agricultores.

Apesar do grande número de projeções climáticas disponíveis a partir de modelos climáticos globais e regionais, ainda existe uma grande incerteza nas projeções climáticas em várias regiões da América do Sul, e mais especificamente do Brasil. Algumas áreas podem apresentar condições mais úmidas, outras são mais secas, mas a fronteira entre elas ainda

não está bem definida. Em muitas partes do Brasil isto pode levar a uma deficiência de água devido à diminuição da precipitação e/ou ao aumento da evapotranspiração, conduzindo a uma redução estimada da disponibilidade de água per capita, o que pode resultar num aumento significativo da insegurança alimentar devido a impactos na produção e preço de alimentos. As projeções atuais, indicam que poderá haver uma redução da oferta de alimentos e consequentemente de um aumento do preço dos produtos agrícolas. Segundo Borges et al (2025) (<https://portalibre.fgv.br/node/11106>), comer está cada vez mais caro e a população mais pobre é a que mais sofre com essa tendência, que também afeta o acesso a alimentos mais saudáveis e menos processados. Não existe apenas uma causa para o encarecimento dos alimentos. Contudo, várias publicações e estudos recentes ressaltam o papel crescente da mudança do clima. Um relatório da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) publicado em junho de 2025 apontou que, desde 2015, secas severas ou extremas atingiram de 25% a 30% da superfície terrestre. É o dobro dos cerca de 15% observados nas décadas anteriores e quase o triplo dos 10% do início do século passado. O mesmo relatório destacou que o Brasil, um dos principais exportadores líquidos de alimentos foi o país que mais sofreu com secas nas últimas duas décadas, tanto em frequência quanto em intensidade desses eventos.

Isto se reflete de forma visível nos números da produtividade agregada da agropecuária brasileira. Segundo dados da USDA, ela cresceu apenas 0,4% ao ano entre 2015 e 2022, após ter avançado expressivos 3,0% anuais entre 1995 e 2014. Essa desaceleração dos ganhos de produtividade econômicos (que, além de levar em conta a evolução do rendimento por hectare, também considera os custos econômicos com insumos), também ocorreu em outros grandes exportadores de alimentos, como os Estados Unidos e a Argentina. Estudos do IPAM, Silva et al (2023) indicam que o aumento das temperaturas e as secas no cerrado brasileiro reduzem a produtividade da soja,

Os cientistas calcularam que toda vez que a temperatura no cerrado subiu 1°C acima da média histórica (1980 a 2018), a produtividade da soja caiu 6%. Importante lembrar que o aumento da temperatura devido as ondas de calor aumentam muito mais do que um grau. Portanto, as mudanças climáticas podem causar um forte impacto na produção da soja, como já causou no sul do Brasil (assad & assad, 2024). Segundo Buainain (2025) O impacto na soja se estende ainda à segurança alimen-

tar, um aspecto frequentemente negligenciado por seus críticos. Ao fornecer proteína vegetal de alta densidade nutricional e ser insumo central na produção de carnes, leite e ovos, a soja é uma das principais responsáveis pelo abastecimento alimentar tanto no mercado interno quanto internacional. Em um mundo que busca garantir alimentação acessível para uma população crescente, a soja brasileira cumpre um papel estratégico — direta e indiretamente — no combate à fome e à desnutrição. A crítica recorrente de que a produção de soja compromete a segurança alimentar ignora essa contribuição essencial, além de desconsiderar que a maior parte da insegurança alimentar no Brasil decorre de desigualdades no acesso à renda — e não da escassez de alimentos.

CENÁRIOS ATUAIS E PROJETADOS DE VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS NO BRASIL ENTRE 1986 E 2050

Segundo o relatório da OCDE, 2025, *Tendencias, Impactos e políticas de adaptação para um mundo mais seco*, as mudanças climáticas aumentaram a área de terra exposta a secas e pioraram os impactos sobre as comunidades e as economias. Além da maior variabilidade das chuvas, o aumento das temperaturas acelera a evaporação, reduz a umidade do solo e aumenta o estresse sobre os recursos de água doce que estão se esgotando. Estima-se que os impactos econômicos de uma seca média hoje podem ser até seis vezes maiores do que em 2000, e os custos devem aumentar em pelo menos 35% até 2035. A figura 2 abaixo indica a mudança do número médio de eventos de seca (a) e (c) e sua intensidade (b) e (d) no período entre 2000 a 2020 em comparação a 1950 – 2000, segundo o mesmo relatório da OCDE (2025).

Mudanças climáticas no Brasil

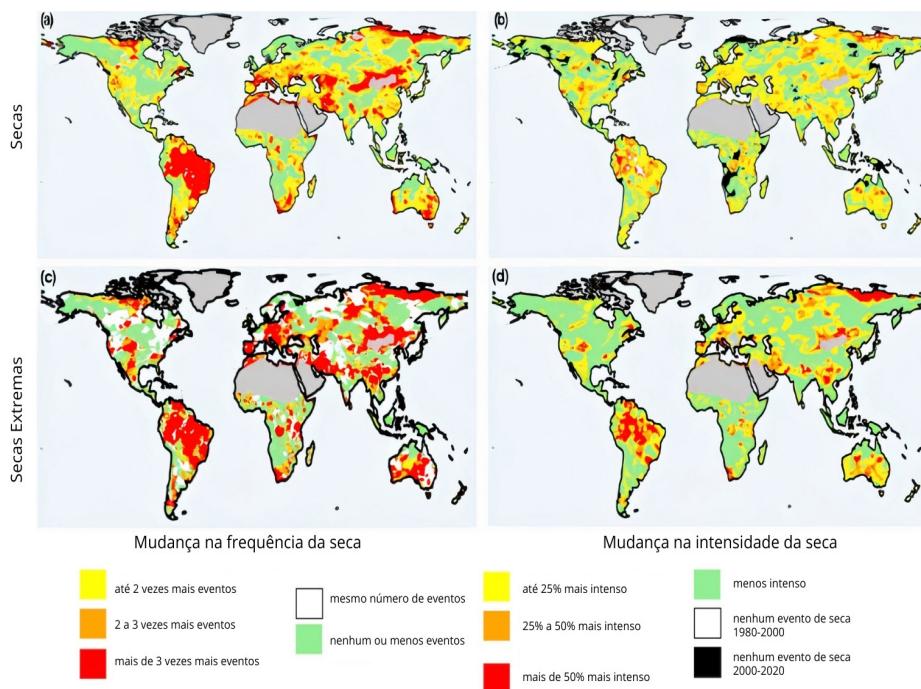


Figura 2: Mudança do número médio de eventos de seca (a) e (c) e sua intensidade (b) e (d) no período entre 2000 a 2020 em comparação a 1950 – 2000. Fonte: OCDE 2025.

O que se observa a partir destes mapas, é que o Brasil está ficando mais seco com forte intensidade da seca. Buscando fazer um downscale nesta análise e identificando a variação do número de dias secos, no Brasil, recente relatório do Banco Central (<https://www.bcb.gov.br/noticia-blogbc/32/noticia>) , a partir dos dados do INPE mostram um aumento significativo do número de dias secos conforme ilustrado na figura 3 abaixo.

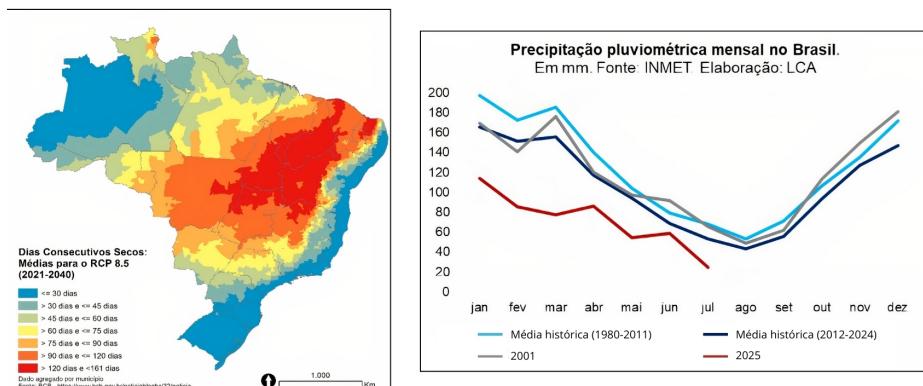


Figura 3: Dias consecutivos secos no período 2021-2040, e perfil da distribuição de chuva no Brasil com enfase à 2025. Banco Central do Brasil - <https://www.bcb.gov.br/noticiablogbc/32/noticia> e LCA (IBRE FGV).

Verifica-se após a análise da figura 3, que os dias secos no Brasil estão aumentando e que mais recentemente, observa-se uma redução na oferta pluviométrica do País. Tais fatos vão provocar um efeito imediato no aumento do risco climático para as culturas nos próximos anos.

Por outro lado, ao se analisar os impactos da ação humana nas mudanças climáticas, a agropecuária é mencionada como uma das principais causas do desmatamento da floresta tropical, contribuindo para o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE), conforme relato de Manzatto (2020)

As emissões do setor, cerca de 31% do total nacional, são oriundas do processo produtivo, ou emissões de gás metano na pecuária, liberação de carbono pelas práticas de manejo do solo e outras IV inventário Nacional 2020, Brasil (2020). Se, por um lado, essas externalidades negativas geradas pela agropecuária podem fragilizar a imagem do setor, por outro lado representam uma excelente oportunidade para reduzir emissões ou mesmo recompor os estoques de carbono que foram liberados ao longo das últimas décadas. Dessa forma, cada vez mais os impactos do aquecimento global no Brasil serão verificados por meio de métricas que façam o balanço entre emissão/remoção. Desde o primeiro inventário de GEE na década de 1990, a rede clima teve um papel preponderante na determinação dos gases de efeito estufa na agricultura. No último inventário disponibilizado em 2020, o papel da rede clima foi fundamental para de-

terminação das emissões e remoções da Pecuária, Uso do solo, emissões do arroz fertilizantes nitrogenados e manejo de resíduos agrícolas.

ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

Uma análise espaço-temporal foi feita no início do estabelecimento do INCT 2-Mudanças Climáticas. Os dados climatológicos foram levantados, organizados e padronizados para todo o território brasileiro. As variáveis consideradas para o período de 01/01/1980 a 31/12/2015 foram evapotranspiração de referência (ETo em mm), precipitação (mm), temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), radiação solar (kWh/dia/m²), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s), utilizando a base de dados *Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013)* (XAVIER et al., 2022). Esta grade de dados climáticos é estimada a partir de dados das estações meteorológicas terrestres no Brasil que são operadas por agências federais brasileiras (INMET e ANA) e pelo departamento de águas e energia elétrica do Estado de São Paulo, num total de 3.625 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas de controle. Informações climatológicas como precipitação futura (mm), temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C) são obtidas a partir do modelo HADGEM2-ES, de 1970 a 2100 e posteriormente recalculada para o Modelo HadGem3 do CIMP6. Neste sentido, como já indicado anteriormente, a agricultura tropical depende da oferta de chuvas, portanto, as mudanças climáticas têm forte impacto nos sistemas produtivos. Modelos climáticos projetam um aumento significativo da deficiência hídrica no solo nas próximas décadas (Figura 4), enquanto oscilações nas precipitações já vêm impactando tanto a agricultura familiar quanto familiar.

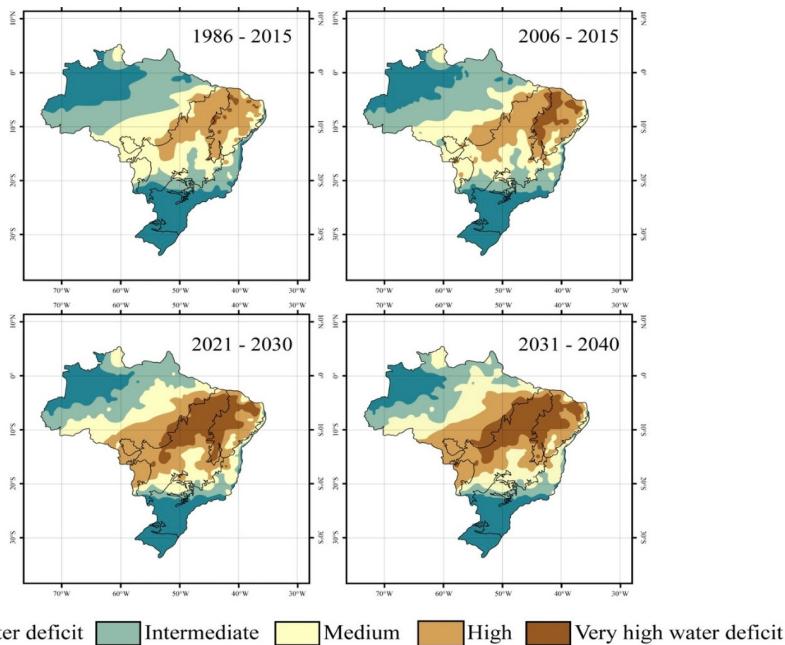


Figura 4: Projeção do aumento da deficiência hídrica no solo nas próximas décadas por modelos climáticos. Fonte: INCT Climate Change Phase 2 Ref: FAPESP 2014/50848-9 CNPq 465501/2014-1.

A estiagem crônica iniciada em 2012 reduziu o crescimento da produtividade agropecuária de 4,2% (1994–2011) para 1,5% (2012–2021) e gerou perda de 0,8 p.p. no PIB anual (<https://blogdoibre.fgv.br/posts/estiagem-de-2012-21-produtividade-agropecuaria-e-transbordamentos-na-economia>). Na Amazônia, mudanças no regime de chuvas e degradação ambiental ameaçam o cultivo soja-milho, dependente da floresta para garantir o início das chuvas e temperaturas adequadas (Leite-Filho et al., 2024). A segunda safra pode cair até 17% até 2050 (Pires et al., 2016; Abrahão & Costa, 2018), e prejuízos anuais podem chegar a US\$ 1 bilhão com até 56% de perda florestal em cenários de fraca governança (Leite-Filho et al., 2021). No Cerrado, forte queda de produtividade de grãos são esperados sob os cenários de média (RCP4.5) e alta (RCP8.5) emissão até o final do século XXI (Camilo et al., 2018).

Modelos indicam que a produção agrícola, especialmente de soja e milho, poderá se deslocar progressivamente do Matopiba para regiões subtropicais do Cerrado e da Mata Atlântica (Zilli et al., 2020). No entanto,

esse deslocamento poderá enfrentar limitações, uma vez que alguns cenários climáticos também projetam perdas significativas de aptidão agrícola no Sul do Brasil (65,7% até 2049), impactando especialmente a produção de milho como segunda safra. No sudeste da Amazônia, a aptidão agrícola também pode ser reduzida em até 84,9%, e a expansão das áreas cultivadas seria insuficiente para compensar essa queda na produtividade como a da cana-de-açúcar (Tanure et al., 2020). Como consequência da redução da produtividade e da geração de empregos associadas às mudanças climáticas, projeta-se uma queda acumulada de 1,18% no PIB da Amazônia Legal até 2049 (Tanure et al., 2020).

Uma redução de 65,7% na área adequada para o cultivo de soja, também poderá ocorrer no Sul do Brasil, com deslocamento das principais regiões produtoras para a porção sudeste da Amazônia, com uma redução projetada de 84,9% de sua área adequada até 2050, afetando principalmente a produção de milho como segunda safra. Por outro lado, os efeitos do aumento da temperatura poderiam beneficiar a produtividade da cana-de-açúcar, especialmente no Sul do Brasil, onde o aquecimento projetado tende a reduzir a frequência de geadas (Assad et al., 2013, Assad et al. 2016). Desastres socioambientais de 2024 causaram perdas agrícolas estimadas em R\$ 15,6 bilhões correspondendo a 48,6% do total dos prejuízos, sendo secas e estiagens e chuvas representando 51% e 48,7% das causas (CNM, 2024). Somente no Rio Grande do Sul, em março de 2020, as perdas diretas e irrecuperáveis nas lavouras de milho e soja atingiram 21% e 16%, respectivamente, totalizando prejuízos de R\$ 4,8 bilhões (MAPA, 2022). Quedas de temperaturas no inverno também afetam a agricultura do Brasil, com exemplos de redução da eficiência agrícola em 6,2% e 10%, com perdas totais de 13,2% por frio e 30,5% por secas entre 2005 e 2006 (Pereda & Alves, 2018). Mudanças no clima também favorecem a incidência de pragas e doenças em plantas cultivadas, com aumento da temperatura e da umidade do ar e do solo (Assad & Assad, 2024).

IMPACTOS NA AGRICULTURA FAMILIAR

A agricultura familiar no Brasil representa 77% dos estabelecimentos rurais, ocupando 23% da área total (80,9 milhões de hectares). Desse total, 48% da área eram destinadas a pastagens, 31% estavam cobertos

por matas, florestas ou sistemas agroflorestais, e 15,5% eram ocupados por lavouras. Esses estabelecimentos responderam por 23% do valor da produção agropecuária (IBGE, 2017). No Semiárido, onde vivem 38% dos agricultores familiares do país (Melo and Voltolini, 2019), mudanças climáticas e a desertificação devem reduzir fortemente a produtividade, sobretudo nas áreas de Caatinga, já 63% alteradas, impactando segurança alimentar, agravando pobreza e conflitos (Lindoso et al., 2014, Niemeyer & Vale, 2022). A aridificação crescente ameaça a subsistência, segurança hídrica e energética na região, causando migração de pessoas e desigualdades (Milhorance et al., 2020; Costa et al., 2024). Em culturas essenciais como feijão, milho e arroz, a seca reduziu as expectativas de produção agrícola em até 68% em 2024 (CEMADEN, 2024b). A seca de 2024 afetou o Sistema Cantareira e as hidrelétricas na Amazônia, comprometendo a agricultura familiar. A percepção dos impactos das mudanças climáticas já é notada por pecuaristas familiares da região do Pampa que relatam como principais riscos as estações irregulares, geadas tardias, extremos climáticos, pragas e esgotamento dos solos (Litre & Bursztyn, 2015).

Dado o grande número de modelos climáticos globais existentes e da divergência observada entre eles, é imprescindível utilizar uma metodologia de avaliação do comportamento dos modelos que seja capaz de identificar os que representam adequadamente a região de interesse. O desenvolvimento do modelo HadGEM2 resultou em um modelo de sistema terrestre de ferramenta científica útil para prever clima futuro e entender as dinâmicas climáticas dentro do sistema Terra (COLLINS et al, 2011). Este modelo foi estabelecido considerando a dinâmica dos ciclos de carbono terrestre e de carbono oceânico, a química atmosférica, os aerossóis, a radiação química e a hidrologia química, descritos por Martin (2011).

A integração do modelo seguindo o protocolo 5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* ou CMIP5) sugere que a representação das condições atuais também é satisfatória (COLLINS et al, 2011).

Utilizando os 14 modelos de projeção climática indicados no CMIP5 para toda a cobertura geográfica brasileira, nos cenários RCP4.5 e RCP 8.5, Marcos Junior et al. (2018) obtiveram como as projeções de temperatura, precipitação e evapotranspiração ao longo do século XXI para o Brasil. As regiões mais afetadas pela elevação da temperatura média anual são o Norte e o Centro-Oeste. Contudo, espera-se aumento destas variáveis para todo Brasil. O mesmo comportamento é esperado para

a evapotranspiração, que reflete o aumento da demanda futura por mais água destinada às áreas de irrigação. Com relação à precipitação obtida, projeta-se que nas regiões Norte e Nordeste haja diminuição das precipitações ao longo do século, enquanto para as demais regiões a maioria dos modelos indica aumento nas médias anuais.

Os resultados mais importantes obtidos no subcomponente agricultura do INCT Fase 2, em 2019, foi finalizar a organização dos dados espaciais referentes ao uso da terra e simular o balanço hídrico para todo o Brasil, em uma grade regular de 25 km, para os anos de 1986-2005, 2005-2015, 2020-2030, 2030-2040 e 2040-2050, utilizando o modelo HADGEM-2-ES. Com o avanço do projeto, para avaliar os impactos na produtividade, utilizou-se o modelo mais recente, ou seja, o HadGEM3-GC31-MM.

O balanço hídrico climatológico (BHC) é a metodologia usualmente empregada para monitorar a quantidade de água armazenada no solo ao longo das estações do ano, que variam em função da perda e reposição de água. O BHC contabiliza a quantidade de entrada e saída de água numa região, no período de 30 anos, conhecido também por normal climatológica, e o sucesso de aplicação da ferramenta depende das variáveis locais (DANTAS et al., 2007).

A demanda por água em cenários futuros pode ser prevista através no balanço hídrico projetado, ou seja, aplica-se a metodologia para uma dada condição inicial e, então, comparam-se os resultados a um conjunto de dados climáticos futuros (GONDIM, 2011; PONPANG-NGA, 2016).

O balanço hídrico foi estimado conforme o esquema ilustrado na figura 5.

Balanço hídrico

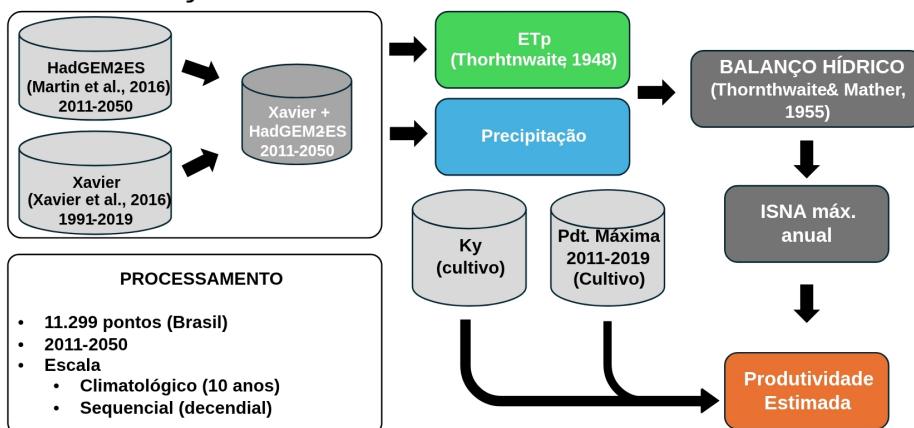


Figura 5: Esquema de simulação do Balanço hídrico para estimativa de variáveis meteorológicas e posteriormente utilizados na estimativa da produtividade.

A partir dos resultados do balanço hídrico, foram obtidos os mapas de deficiência hídrica ilustrados anteriormente na figura 4, e mapas de temperatura, ilustrados na figura 6, que indicam quais áreas serão mais afetadas pelo aumento da temperatura e redução das chuvas.

A sequência de etapas para elaboração da metodologia para projeções climáticas está sujeita a inúmeras incertezas que são agregadas ao processo de modelagem matemática. Contudo, apesar de tais limitações, esta é a metodologia que vem sendo utilizada para quantificar os efeitos da interferência de ações antrópicas no sistema climático com a finalidade de propor estratégias de mitigação e adaptação aos novos cenários (TORRES, 2014).

Para prever a influência das mudanças do clima na agricultura, as projeções climáticas elaboradas por etapas de modelagens matemáticas consideram também as forçantes radiativas, conhecidos como RCPs, que consistem em séries temporais de concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa e aerossóis. Os RCPs foram selecionados para abranger uma variedade de futuros viáveis, desde os otimistas, nos quais a forçante radiativa decorrente de ações antrópicas é reduzida (RCP 2.6), até situações pessimistas (RCP 8.5). Há também os cenários intermediários, como no caso do RCP 4.5 (LIDDICOAT et al 2013).

Em geral, 85% da produtividade das culturas depende diretamente da maior ou menor deficiência de água no solo.

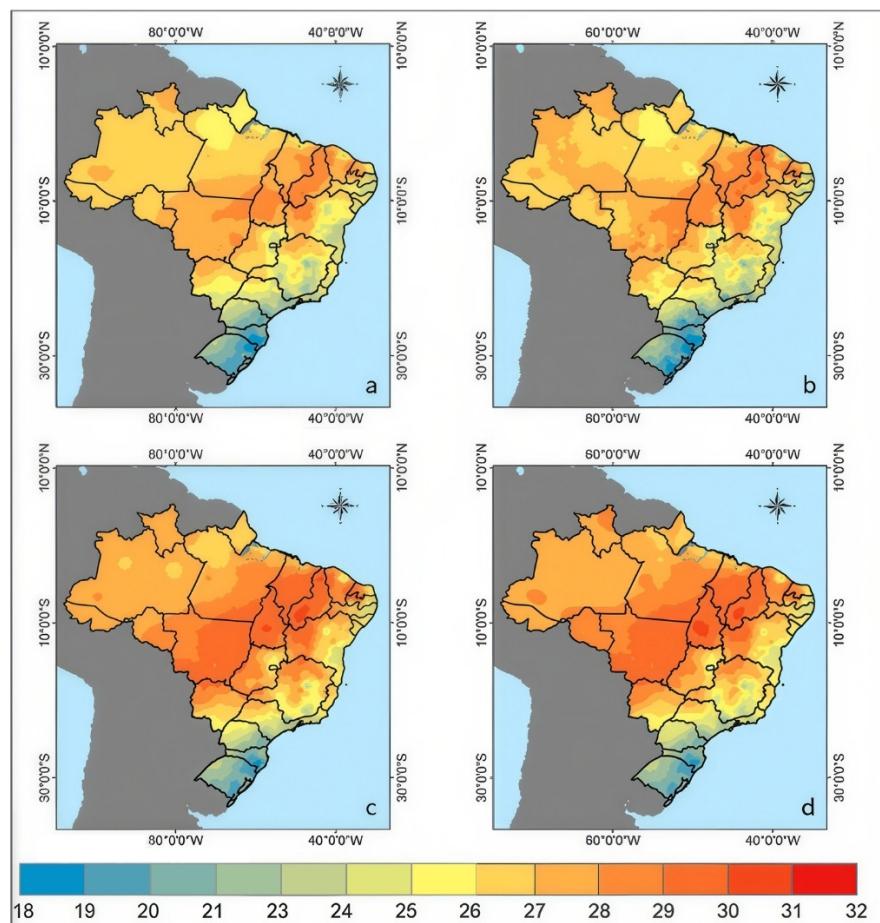


Figura 6: Mapas de temperatura, obtidos a partir dos dados dos modelos HAD-GEM2 e *Daily gridded meteorological variables in Brazil* para os períodos 1986-2015, 2006-2015, 2021-2030 e 2031-2040.

A evapotranspiração na média climática varia de 801 mm a 2.287 mm no Brasil, sendo a ETP total máxima de 2.465 mm, 2.901 mm e 2.877 mm para as séries históricas 2006-2015, 2021-2030 e 2031-2040, respectivamente. Enquanto a mínima é de 749 mm para 2006- 2015 e manteve-

-se no índice de 826 mm para 2021-2030 e 2031-2040 na média para todo território (figura 7).

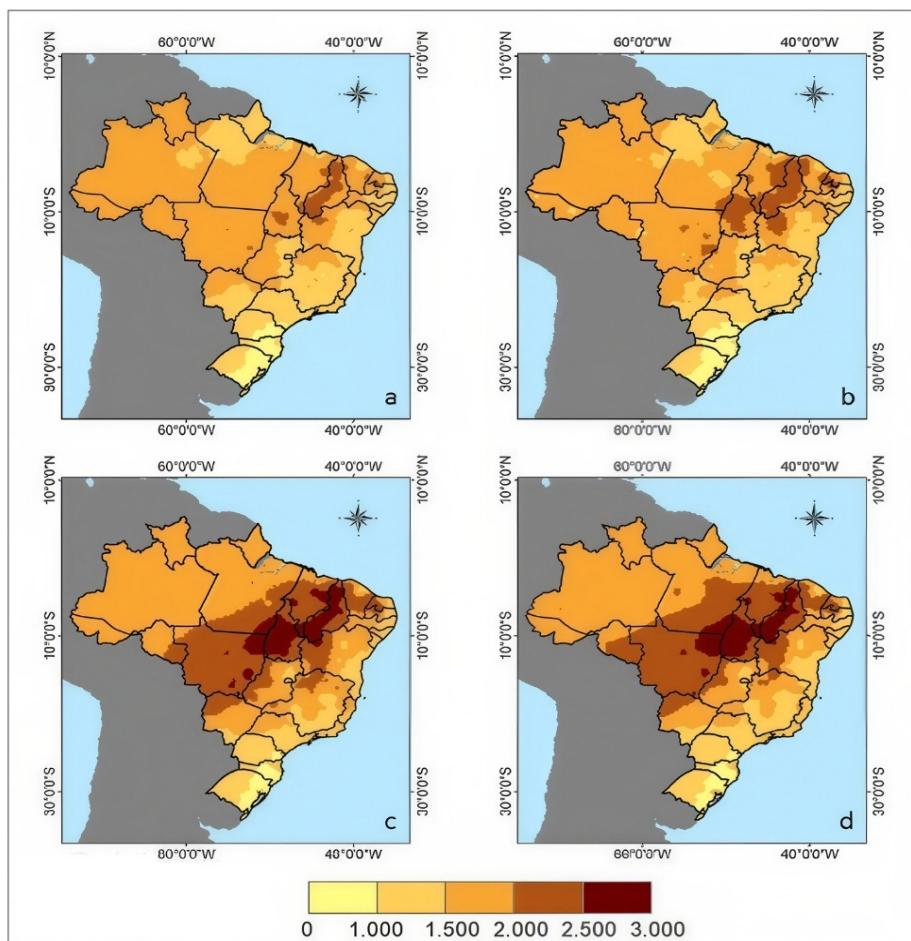


Figura 7: Evapotranspiração total (a) 1986 - 2016; (b) 2006-2015; (c) 2021-2030; (d) 2031-2040.

A utilização de séries de dados meteorológicos comparadas à normal climatológica permite a comparação direta entre a condição do período base (“atual”) com cenários futuros. Portanto, utilizando um dos cenários futuros do IPCC, como o presente no modelo HadGEM2-ES, com a forçante RCP8.5, observam-se os seguintes impactos: **aumento da temperatura, aumento da evapotranspiração potencial, redução do excedente hídrico e aumento da deficiência hídrica**. Essa tendência permite

uma proposição de modelo de organização territorial junto com soluções alternativas, para resolver ou minimizar o quadro levantado pelas emergências climáticas.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTOS NA PRODUÇÃO DE GRÃOS

Em função da avaliação de parâmetros fortemente influenciados pelas mudanças climáticas, é importante verificar qual foi a evolução da oferta de alimentos, em termos de produção agrícola, para alguns componentes da cesta básica, como, arroz, feijão, trigo e mandioca, que têm importante relação com a segurança alimentar.

Considerando a relevância do setor agropecuário brasileiro, o planejamento de suas atividades e proposição de políticas públicas deve ser feito de forma a manter modelos sustentáveis ao longo de décadas. As condições edafoclimáticas brasileiras variam em toda sua extensão; portanto, conhecer essa variação e modelá-la ao longo do tempo e do espaço é importante para avaliar as áreas que podem alcançar maior ou menor produtividade, bem como seu risco, principalmente relacionado a fatores climáticos. Esse conhecimento diz respeito tanto a entidades governamentais quanto privadas, pois seus impactos negativos podem deteriorar o desenvolvimento da sociedade nos aspectos econômicos, sociais e ambientais. Por outro lado, estratégias bem estruturadas trazem oportunidades de escolher uma melhor gestão para áreas de maior risco e melhorar a alocação de investimentos para aquelas com menor risco, por exemplo.

A simulação das variações climáticas utilizando modelos agrometeorológicos deve ser temporal e espacialmente bem dimensionada para melhorar as ações de tomada de decisão. Assim, modelos de balanço hídrico podem ser aplicados em todo o país com o objetivo de caracterizar o volume de água disponível para exploração agrícola. Esta prática é muito comum na avaliação de riscos climáticos para agricultura.

Desde 1996, o Brasil adota uma política pública conhecida como Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), com forte apoio da rede clima do MCTI, que indica para todos os 5.568 municípios brasileiros o que plantar, quando plantar e onde plantar, com nível de risco de 20%. Ou seja, de uma maneira geral quem seguir essas indicações poderá ter 80% de chance de sucesso na colheita da lavoura. Esse sistema utiliza 30 anos de dados diários de chuva e temperatura, que vão sendo atualizados ao

longo dos anos. Uma estratégia para buscar a inferência das mudanças do clima é de a cada ano, incorporar os dados do ano anterior e eliminar os dos do primeiro ano de simulação. Com isso é possível incorporar as alterações climáticas que estão ocorrendo. Uma discussão premente é, mantém-se a série de 30 anos, ou reduz-se essa série para 10 anos, considerando a velocidade com que as mudanças do clima estão ocorrendo?

Os dados utilizados como entrada no modelo (Zarc), utilizados para estimativa de perdas de produtividade, foram extraídos de dois modelos meteorológicos distintos, um focado na modelagem meteorológica do passado (Xavier et al., 2022) e o outro com o objetivo de modelar as tendências futuras dos fatores climáticos, principalmente temperatura e precipitação. Os ganhos de água são contabilizados pela precipitação e as perdas pela evapotranspiração, considerando a variância temporal em intervalos sequenciais e decadais. Além disso, são considerados três cenários do sistema radicular, com profundidade rasa (75 mm), média (100 mm) e mais profunda (125 mm) do volume de água. Devido ao grande volume de dados, todas as etapas de processamento foram conduzidas por meio de uma estrutura que automatiza o cálculo do balanço hídrico em todas as mais de 11 mil estações meteorológicas virtuais do chamado modelo (Xavier et al., 2022). Os produtos resultantes foram exportados como resultados de uma única estação, para cada valor de capacidade hídrica disponível (representando a profundidade do sistema radicular) e para cada década, bem como para o todo. Para se estimar as perdas de produtividade futuras, são utilizados os dados do Modelo CIMIP6 corrigido. Assim é possível, utilizando a base metodológica do Zarc, verificar o impacto na produtividade nos próximos anos (2020 a 2050).

Apesar dos grandes avanços científicos no uso do geoprocessamento de imagens de satélite para estimar a área de culturas agrícolas, ainda não existe um método preciso para avaliar as perdas na produtividade. Assim, são utilizados os seguintes parâmetros de culturas:

- Duração do ciclo vegetativo, subdividido em fases fenológicas, pela identificação de períodos críticos (estágios), como período inicial, desenvolvimento da cultura, meia estação e final da estação;
- Kc (coeficiente de cultura), como método de definição da demanda de água da planta;
- Profundidade do sistema radicular, particularmente importante para estimar a capacidade de água disponível (CAD).

- O procedimento de coleta e análise de dados para estimativa de produtividade está indicado no esquema da figura 8.

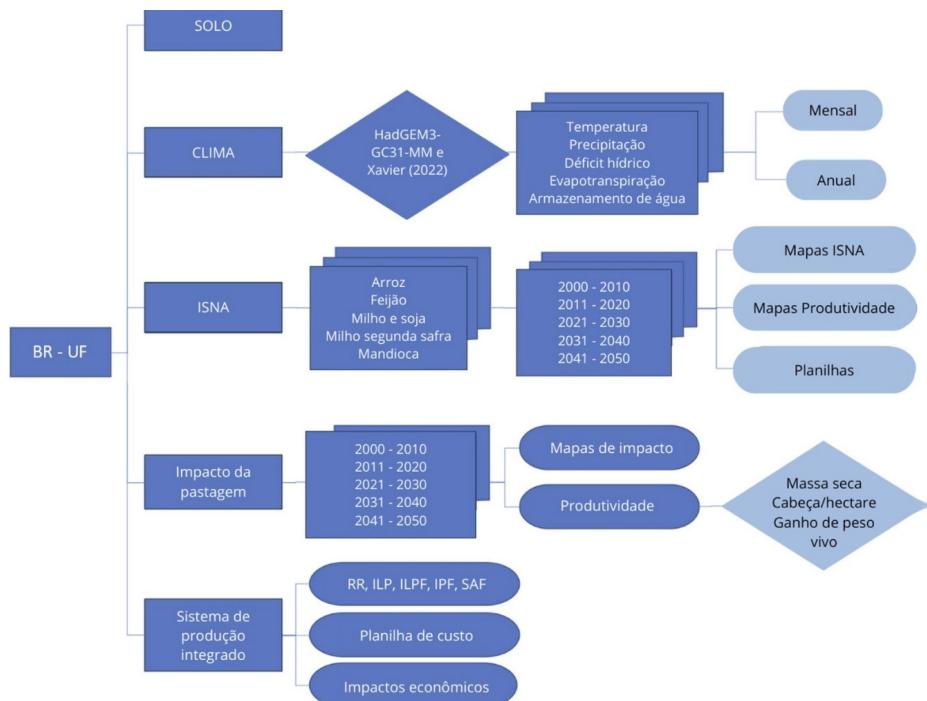


Figura 8: Esquema adotado para estimar a produtividade das culturas até 2050.

A primeira vez que esse método foi utilizado para avaliar perdas na agricultura foi em Assad e Pinto (2008), utilizando o modelo Precis do IPCC. As avaliações das perdas foram feitas até o ano de 2070. Já em 2007 o modelo indicava que em 2020 poderia haver perdas em grãos na região Sul no valor de 7 bilhões de reais. Nesse caso, houve um erro no valor absoluto. Segundo a CONAB em relatório Brasil 2021, histórico de perdas de safras no Brasil, a projeção do montante perdido no Brasil, correspondeu a 36,7 milhões de toneladas. Na cotação semanal de março de 2020 (21 a 25 de março de 2020), o preço pago ao produtor, de acordo com Brasil 2021, considerando as devidas proporções perdidas para cada produto, o valor monetário das perdas correspondeu a R\$ 84,8 bilhões.

Os cenários de avaliação de perdas foram se ajustando em função dos novos modelos climáticos lançados pelo IPCC. Assad et al. (2016), a

partir relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), e utilizando as simulações dos modelos mais recentes referentes aos cenários das mudanças do clima até o ano de 2100, fizeram projeções de impactos para as principais culturas brasileiras e que dizem respeito à agricultura familiar, como milho, milho safrinha, feijão e arroz, e de quão vulneráveis estão estas culturas se a temperatura continuar subindo nas atuais taxas ($0,3^{\circ}\text{C}$) por década. Ao mesmo tempo, foi feito um esforço de caracterizar os eventos extremos que vêm ocorrendo com maior frequência nos últimos anos. Projeções para os próximos anos referentes à frequência de ocorrência de temperaturas diárias superiores a 34°C foram feitas para todo o país, e atingem todos os agricultores. Isso foi feito para as chuvas extremas, ou seja, estimadas as frequências de ocorrência de chuvas intensas em todo o país, o que tem consequências imediatas na erosão dos solos, em perdas de fertilizantes e na desestruturação dos solos, além de perda de produtividade das culturas. Todas as simulações foram feitas a partir dos modelos do último relatório do IPCC AR5, com os cenários extremos RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados desta simulação feita em 2016, manteve as tendências de perdas acentuadas na agricultura, que segundo a Conab seguiu um padrão de 15% das perdas na safra.

No relatório do INCT – 2021, no componente segurança alimentar, com a avaliação dos resultados com o modelo HadGEM3-GC31-MM, os resultados parecem mais pessimistas do que os do modelo CIMP6 HA-Dgem2-ES. As perdas de rendimento foram maiores do que as obtidas no modelo anterior.

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos com o modelo HadGEM-3-GC31-MM do CIMP6 e as respectivas tendências de perdas na agricultura até o ano de 2050. No caso da soja nos cerrados a perda estimada na produtividade é de 26% no período.

Tabela 1: Resultados obtidos com o modelo HadGEM3-GC31-MM do CMIP6 e as respectivas tendências de perdas na agricultura até o ano de 2050**MODELO: HADGEM3 - GC - CMIP 6 - RCP 8.5****Produtividade (kg/ha)**

Bioma	Cultura	2011/2020	2021/2030	Diferença	Diferença (%)
Amazônia	Soja	3.078	2.456	623	20
	Milho	2.543	2.795	252	10
	Arroz	1.917	1.907	10	1
	Feijão	678	679	2	0
Cerrado	Soja	3.244	2.399	845	26
	Milho	4.331	4.879	548	13
	Arroz	2.105	1.867	238	11
	Feijão	1.179	1.077	103	9
Floresta Atlântica	Soja	3.349	3.524	175	5
	Milho	4.818	5.329	510	11
	Arroz	3.542	3.433	109	3
	Feijão	1.171	1.112	58	5
Pampa	Soja	2.458	2.845	87	16
	Milho	3.812	3.756	56	1
	Arroz	7.337	7.337	-	-
	Feijão	1.030	1.030	-	-
Caatinga	Soja	-	-	-	-
	Milho	660	722	62	9
	Arroz	1.604	1.819	215	13
	Feijão	321	344	23	7

Fonte: Relatório INCT-Fase2 2022. Assad & Assad (2024)

2031/2040	Diferença	Diferença (%)	2041/2050	Diferença	Diferença (%)
2.504	574	19	2.562	516	17
3.597	1.054	41	2.867	324	13
1.825	92	5	1.766	151	8
672	6	1	660	18	3
2.277	967	30	2.486	758	23
6.964	2.633	61	5.227	896	21
2.083	21	1	1.897	207	10
1.210	30	3	1.166	14	1
3.523	174	5	3.702	353	11
6.176	1.358	28	5.608	790	16
3.708	166	5	3.513	29	1
1.193	22	2	1.178	7	1
2.819	361	15	2.998	540	22
3.314	498	13	3.936	124	3
7.337	-	-	7.337	-	-
1.030	-	-	1.030	-	-
-	-	-	-	-	-
925	265	40	716	56	8
1.879	75	17	1.899	295	18
374	53	16	374	53	16

Segundo os resultados dos modelos agrometeorológicos, utilizando os dados do CMIP6, indicados na Tabela 1, em todos os casos, o impacto na produtividade é negativo, o que indica uma possível redução na oferta de alimentos se as práticas atuais de produção forem mantidas. Entretanto, com a adoção de práticas agrícolas do programa ABC, ABC+, Agricultura regenerativa e a intensificação da produção, o que se tem observado é um aumento da produtividade, especialmente da soja e do milho. Na figura 9 é indicado as perdas de soja no Estado do Rio grande do sul, entre os anos 2010 e 2022.

Com o uso de modelos matemáticos calibrados para as condições do Cerrado, Macena et al. (2024) conseguiram simular as emissões de óxido nitroso (N_2O), sob diferentes sistemas de manejo para um período de 50 anos. Os autores constataram que, com o aumento da temperatura ao longo do tempo, essas emissões serão cada vez maiores, enquanto a produção de biomassa e o rendimento de grãos diminuirão. Esses resultados pela via da emissão dos GEE mostram claramente que haverá perdas na produção de grãos no Brasil.

Já no trabalho de Assad et al. (2019b) são indicadas as áreas de maior risco de perdas. A área em vermelho na Figura 10 mostra a dimensão do problema, com aumentos significativos da temperatura, comprometendo a produção agrícola no Brasil nos próximos anos.

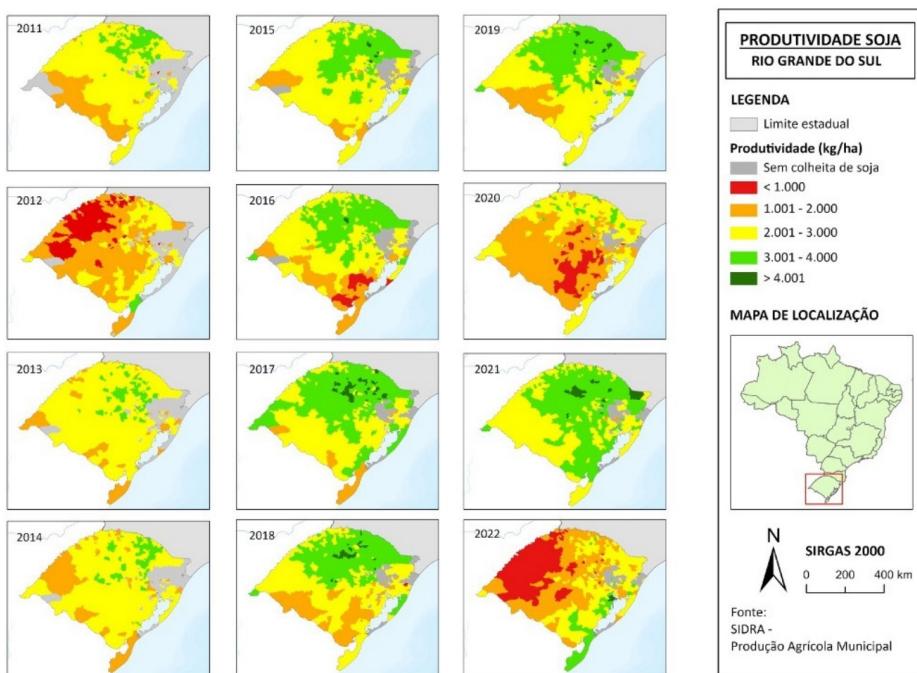


Figura 9: Variação espacial das perdas de produtividade no Rio Grande do Sul, no período de 2010 a 2022. Fonte: Assad & Assad (2024).

Finalmente na figura 10 é indicado em Vermelho as áreas que poderão ter temperatura elevadas e com fortes ondas de calor que irão comprometer a produção agrícola.

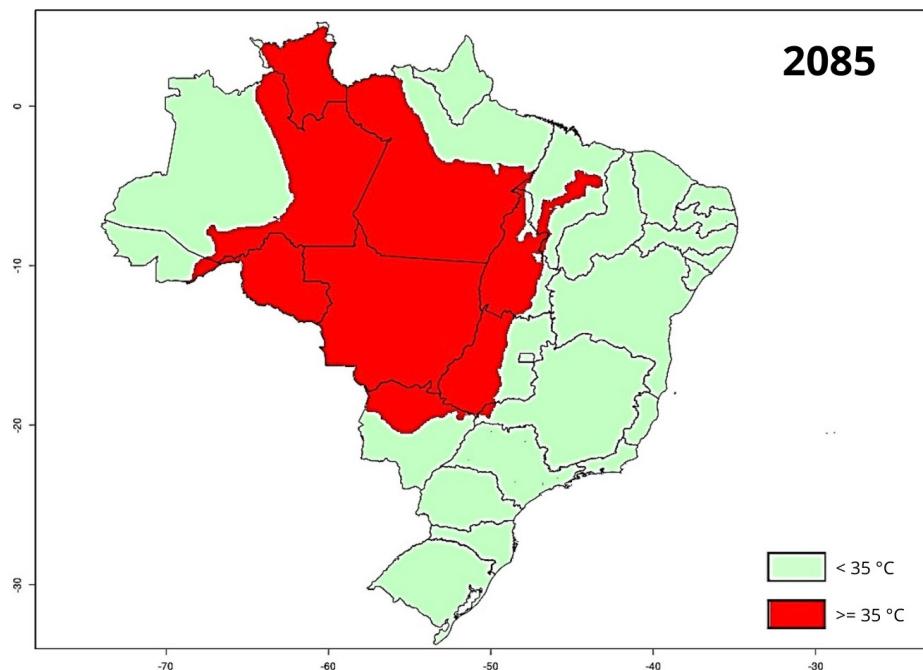


Figura 10: Mapa do Brasil com o corte de temperatura acima de 35 °C para o ano de 2085. A região em vermelho é de alto risco para produção agrícola. Fonte: Assad et al. (2019b).

Analizando-se todo o período e todas as culturas, percebe-se que haverá uma retração da área plantada principalmente para as culturas de arroz, feijão e mandioca e um pequeno acréscimo na área de milho. Isso significa que pouco a pouco essas áreas serão substituídas por *commodities* como soja e milho e isso certamente terá reflexo na oferta de alimentos. A figura 11 ilustra a projeção das áreas plantadas até o ano de 2050 para várias culturas do Brasil.

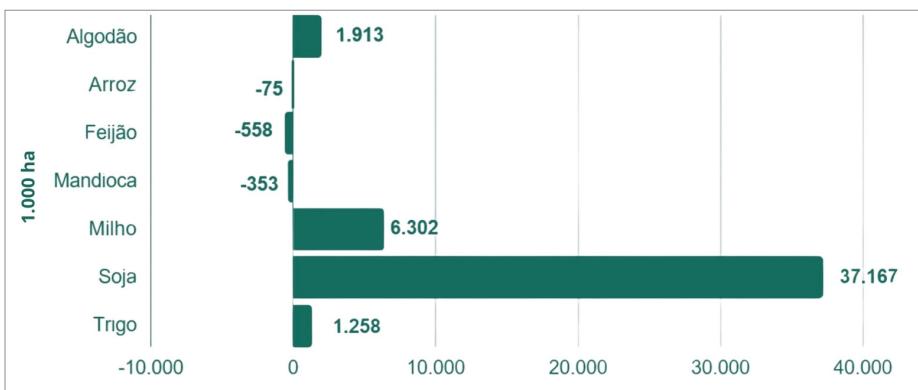


Figura 11: Variação da área plantada para várias culturas do Brasil entre os anos de 2021 e 2050. As culturas de feijão, arroz e mandioca apresentam uma diminuição da área plantada enquanto soja e milho apresentam um aumento na área plantada.

As projeções da produção e da área das principais culturas mostram que a área plantada no Brasil deve ultrapassar 100 milhões de hectares em 2050, considerando que atualmente são 78,2 milhões de hectares. Essa expansão está concentrada em soja, milho (segunda safra) e, cana-de-açúcar. Parte do aumento da produção de milho e algodão deve se dar na área de soja. Algumas lavouras, como arroz, feijão e mandioca, devem perder área. Naturalmente, uma parcela da expansão de área de soja, milho e cana-de-açúcar deverá ocorrer em novas áreas e substituição de outras lavouras. Essa expansão também poderá ocorrer em áreas de pasto degradado. Contudo, é de suma importância que haja uma aceleração da conversão, por falta de manejo, de áreas de pastagens de baixa ou baixíssima produtividade em áreas de lavouras ou em sistemas integrados de produção.

Até 2050, há necessidade de acomodar uma expansão de cerca de 45,6 milhões de hectares em áreas de lavouras. Essa expansão implica em um incremento de 37 milhões de hectares à área atual de soja e cerca de 6 milhões de hectares à área atual de milho. A redução da pressão pela extensão da área de lavouras no Brasil passa obrigatoriamente pela ampliação de técnicas e tecnologias que aumentam a produtividade da terra sem a necessidade de novas áreas. A ampliação do Sistema de Plantio Direto de alta qualidade, associado com sistemas integrados de produção podem colocar a produtividade dos grãos em um novo patamar.

Adicionalmente, o avanço rápido da pesquisa, inovação e tecnologia de novos cultivares deve ampliar a adoção da fixação biológica de nitrogênio em leguminosas (feijão) e gramíneas, contribuindo com a produtividade de milho, arroz e pastagens.

Com o aumento da temperatura e redução da oferta de chuva, a situação da produção de alimentos pode ser afetada. Nos últimos cinco anos o que se observou foi forte impacto das mudanças do clima na produção de soja e milho, reduzindo a safra em mais de 25 milhões de toneladas.

Um necessário resumo destes cenários para produção de grão indica que:

Muitos são os problemas enfrentados pela agricultura no Brasil e no mundo, principalmente por agricultores familiares, especialmente aqueles relacionados à pobreza e seus efeitos. As atuais vulnerabilidades sociais dessas populações são suscetíveis a aumentar com os impactos provocados pela mudança do clima.

Dentre os principais problemas identificados, podemos destacar:

1. 95% das perdas no setor agrícola brasileiro ocorrem em razão de inundações ou secas (Assad et al., 2008). Projeta-se que tais eventos extremos ocorram com mais frequência;
2. Considerando a magnitude relativa da variabilidade das precipitações em três escalas temporais - interanual, decenal e no longo prazo (100 anos), “a proporção da variação total explicada pela variabilidade do curto prazo é três vezes maior do que a tendência de longo prazo (mudança climática), e duas vezes maior do que a variabilidade decenal” (Baethgen, 2010);
3. A tendência futura indica redução das chuvas ao longo do tempo para as regiões Norte e Nordeste .
4. As principais perdas no ambiente rural projetadas por recentes estudos indicam a perda de terras agricultáveis como principal fator;
5. As regiões semiáridas do Nordeste ficarão mais secas, enquanto a parte leste da Amazônia brasileira se tornará um bioma mais parecido com a savana;
6. Para a agricultura, a tendência de seca pode levar a resultados negativos no âmbito da segurança alimentar, fator que acarretará preocupações para os agricultores familiares. Um exemplo que reflete essa preocupação é a projeção de que a mandioca pode desaparecer das regiões semiáridas do Nordeste. Projeta-se que

a produção de milho também seja severamente impactada no Agreste do Nordeste

7. Algumas culturas de sementes adaptadas ao clima tropical poderão migrar para o Sul do Brasil ou regiões mais altas para compensar o aumento na temperatura (Assad et al., 2008). Essa migração pode resultar na concorrência entre as áreas, bem como na migração do trabalho rural para regiões mais favoráveis;
8. Outros fatores esperados no âmbito do estresse criado nos sistemas agrícolas são a redução da fluidez das águas e do potencial de irrigação, aumento da incidência de pestes e doenças, mudanças nos biomas e diminuição da biodiversidade de animais e plantas.

PASTAGENS E EMISSÕES DA PECUÁRIA

Segundo o MAPA(2024), o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (PNCPD), instituído pelo Decreto nº 11.815 de dezembro de 2023, *solidifica o compromisso do Brasil com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o Acordo de Paris, por meio da promoção de políticas e ações para mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e adaptação às mudanças climáticas*. Este programa surge em um contexto no qual há o entendimento de que a preservação e o uso sustentável dos recursos naturais estão integrados à promoção da segurança alimentar e nutricional, bem como ao desenvolvimento econômico do país.

Em relação à pecuária bovina, em 2022, o país registrou um rebanho de 234,3 milhões de cabeças (IBGE, 2022)¹, produzindo 8 milhões de toneladas de carne (IBGE, 2024)². Deste total, 2,9 milhões de toneladas foram exportadas, representando 22,9% das exportações mundiais (FAO, 2023)³. Para sustentar essa produção, a pecuária brasileira ocupa uma área de 179 milhões de hectares de pastagens (LAPIG, 2022). No entanto, mais de 60% dessas pastagens encontram-se com baixo ou médio vigor (degradadas ou em processo de degradação), resultando em baixa produtividade e elevadas emissões de GEE. A conversão dessas áreas degradadas em sistemas de produção sustentáveis é crucial para a preservação dos biomas, a redução das emissões e o aumento da produtividade agropecuária.

Outra consideração é que, a partir dos avanços científicos nos sistemas de produção de soja e milho, é possível indicar que o aumento da produção dessas culturas deverá ocorrer pela conversão de áreas de pastos degradados. Com esta estratégia é possível adotar sistemas integrados de produção, onde numa mesma área é possível praticar duas lavouras e aumentar a produtividade da carne, com redução de emissão de GEE.

O bioma Cerrado é um bom exemplo de possível adoção dos sistemas integrados. No início da ocupação do Cerrado brasileiro, com a introdução do plantio da soja, as cultivares eram de ciclo longo com produtividade em torno de 1,7 toneladas por hectare (Arantes e Souza, 1993). Atualmente a produtividade média no Cerrado passou de 2,9 t.ha⁻¹ a 3,26 t.ha⁻¹ (PAM 2022). Esses resultados oficiais indicam um ganho médio de produtividade superior a 170%, ou seja, superior a 4% ao ano. Entretanto esses ganhos vêm diminuindo e estão no patamar de 1,2%. Plantando uma única safra por ano, com as práticas de preparo, adubação, plantio e colheita, significa utilizar 42% do tempo útil do cultivo agrícola na propriedade. Após a colheita, o solo fica exposto e nos outros 58% do tempo útil há emissões de GEE, erosão, baixa infiltração de água etc. Essa foi a premissa utilizada nos estudos anteriores, ou seja, indução ao desmatamento para produzir mais, com alta emissão de GEE. Introduzindo a prática de manejo de solo baseada nos sistemas integrados, os solos ficam cobertos por mais tempo, evitando perdas de solo e aumentando a quantidade de água e a capacidade de infiltração. A combinação soja e milho permite uma produtividade **média nacional** em torno de sete toneladas de grãos por hectare, crescendo a taxas superiores a 3 a 4% ao ano. Portanto, somente desmatar para produzir não é uma prática sustentável.

O exemplo acima pode ser ilustrado pela Figura 12 que mostra como funciona o manejo de culturas em áreas com pastos degradados. No caso do Mato Grosso, a média de produtividade em sistemas integrados pode chegar a 9,5 toneladas de grãos/ha, com uma remoção média de 1.3 t C/ha/ano.

Evolução dos sistemas de produção

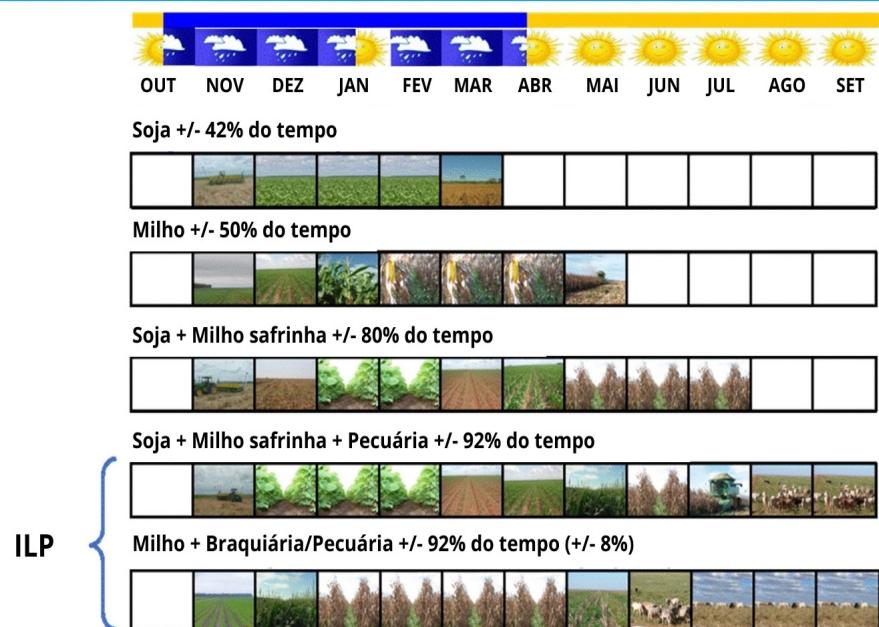


Figura 12: Evolução dos sistemas de produção solteiro para sistemas integrados.
Fonte: Vilela, 2019. CBAGRO.

A Figura 13 indica como é o ciclo da emissão/remoção de carbono após o desmatamento com a introdução da recuperação de pastos, ao longo dos anos.

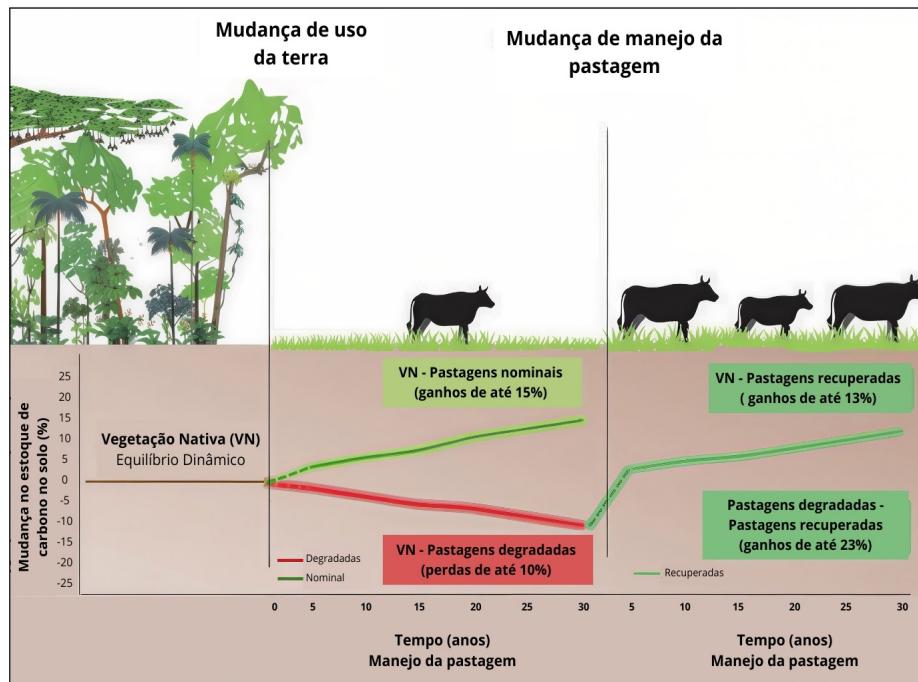


Figura 13: Ciclo das emissões e remoções após o desmatamento e com a adoção do manejo de pastos recuperados. Ilustração de Bruna E. Schiebelbein. Fonte: Ruiz et al. 2023.

Observa-se que ao longo dos anos a perda nominal de carbono no solo é estimada em 10%, podendo ter um ganho de até 23% com a recuperação dos pastos degradados. Ao introduzir as culturas, por exemplo soja+milho, o ganho seria mais carbono no solo e aumento da produtividade da área. Esta hipótese, adotada pelo Plano ABC/ MAPA, duplica a produção sem haver necessidade de desmatar.

O ciclo soja+milho não fixa carbono, mas ao introduzir o pasto no sistema ao longo dos anos há um ganho importante de matéria orgânica no solo, e consequentemente de carbono orgânico, como indicado na Figura 14.

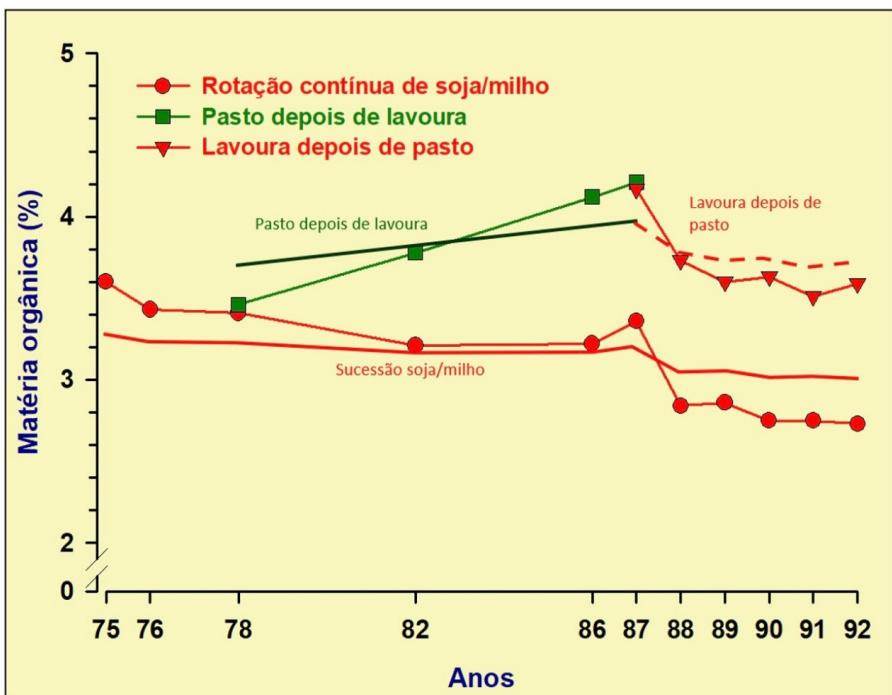


Figura 14: Variação do teor de matéria orgânica no solo em sistemas de rotação contínua de soja e milho, pasto depois de lavoura e lavoura depois de pasto. Fonte: Sousa et al. (1997).

Com o aumento do sistema radicular no pasto de Brachiaria, observa-se um ganho substancial na matéria orgânica do solo e consequente aumento no carbono orgânico. Com isso, tem-se como benefícios maior infiltração de água, redução da erosão do solo e aumento da tolerância aos veranicos intensos.

Nos estudos desenvolvidos na fase dois do INCT-Mudanças Climáticas, procurou-se identificar onde estavam estes pastos degradados e utilizando **metodologia da Embrapa (2018)** para priorização de áreas de pastos degradados que podem ser transformadas em sistemas produtivos, este potencial foi mapeado e quantificado.

Neste caso foram identificados 2.390 municípios com pastos degradados, totalizando 94 milhões de hectares degradados ou medianamente degradados. Destes, 22,5 milhões de hectares, distribuídos em 432 municípios, são considerados com prioritários para recuperação em três níveis: Municípios com até 30 mil hectares de pastos degradados, até

45 mil e até 60 mil hectares. Segundo os critérios de priorização, este seria o montante final que poderia ser convertido no sistema ILPF (Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta). Na figura 18, estão identificados os municípios que devem ser priorizados e sua distribuição geográfica.

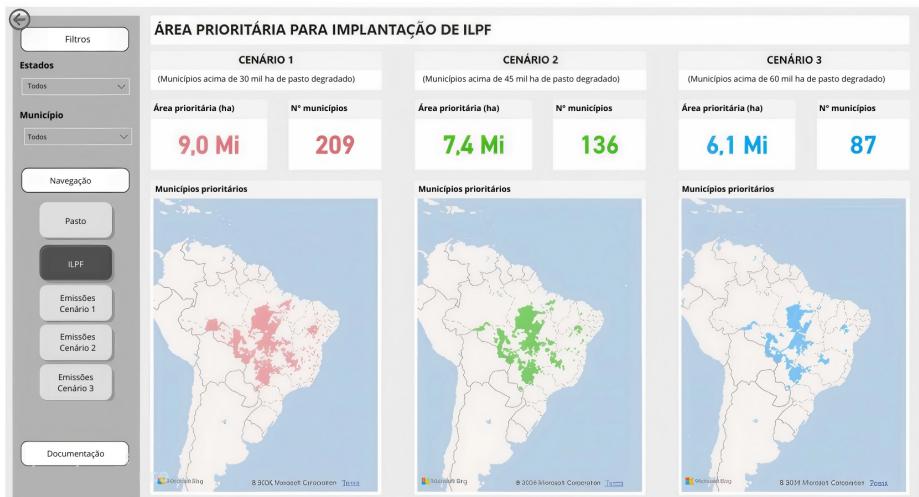


Figura 15: Municípios identificados com maior aptidão para implantação de ILPF em pastos degradados.

Isso corresponde à **redução** pela pecuária de 11,5 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, sem considerar as remoções.

AÇÕES OFICIAIS DO GOVERNO BRASILEIRO

Uma análise de conjuntura mais detalhada dos agricultores e pecuaristas brasileiros indica que:

- A grande maioria dos agricultores são conservadores.
- Ainda apresentam dificuldades de entendimento do processo de aquecimento global.
- Em torno de 40% não assimilaram ainda a origem da emergência climática.
- Está havendo uma evolução rápida para a adoção de práticas referentes a agricultura regenerativa.

- Ainda é possível constatar que alguns adotam práticas de desmatamento e queimadas para produzir.
- A evolução tecnológica tem permitido avanços importantes por parte dos agricultores no entendimento das mudanças climáticas.
- Uma parcela importante de agricultores, principalmente na região centro oeste é guiada por orientações de negacionistas que tem forte influência no setor.

Visando contornar e minimizar essa situação o governo tem implementados vários planos de ação com recursos alocados no plano safra que basicamente seriam:

Plano ABC

Plano ABC+

Plano Nacional de Fertilizantes

Plano Safra

Programa de Aquisição de Alimentos

Programa de recuperação de pastos degradados.

Programa Floresta +

Controle e prevenção do desmatamento e dos incêndios florestais

Biodiversidade - Fauna e Flora

Com estes planos já com financiamento definido no plano safra, abre-se uma grande janela de oportunidades para a agricultura e pecuária brasileira, para se reduzir os impactos das mudanças do clima e aumento de produção. Essas oportunidades seriam:

- O Brasil pode dobrar a produção agropecuária sem desmatar.
- Com sistemas integrados, o Brasil pode oferecer produtos com baixa ou baixíssima pegada de carbono, atendendo a exigências dos mercados externos.
- Em pouco tempo, o país pode se tornar o maior sumidouro de carbono do Planeta, sem queimadas e desmatamento.
- Adotando as práticas corretas, é viável a redução de 30% nas emissões de metano da pecuária.
- O Brasil pode suprir a necessidade de alimentos no mundo com aumento de mais 40% na oferta da produção agropecuária.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O subcomponente segurança alimentar do INCT-FASE 2 abordou o tema da agricultura e oferta de alimentos sobre diversos aspectos.

O primeiro deles foi de identificar a vulnerabilidade climática para agricultura brasileira, considerando a deficiência hídrica, a temperatura e a evapotranspiração. A avaliação da vulnerabilidade permitiu concluir que em todos os aspectos, num horizonte de produção agrícola até o ano de 2050, se nenhuma medida de adaptação ao clima for feita, a produção agrícola estará comprometida. Observou-se um significativo aumento da deficiência hídrica, indo na direção da região Nordeste para a região Centro-oeste. As consequências do aumento da deficiência hídrica, associada ao aumento da temperatura e da evapotranspiração, teria forte impacto na produção de milho (segunda safra) e redução da produtividade da soja. Já na região Sul, com possível aumento da chuva anual, essa região seria menos vulnerável na produção de celulose, em função da baixa ou nenhuma deficiência hídrica, e a possível consolidação da produção de culturas perenes.

Num segundo momento, a partir dos estudos desenvolvidos no INCT e na rede clima, com relação às principais culturas que fazem parte da cesta básica, observou-se que haverá uma retração da área plantada, principalmente para as culturas de arroz, feijão e mandioca e um pequeno acréscimo na área de milho. Isto significa que pouco a pouco essas áreas serão substituídas pelas *commodities* como soja e milho e isto certamente terá reflexo na oferta de alimentos. Foram identificados ganhos de produtividade na produção de arroz, nenhuma alteração na produtividade do feijão, um ganho razoável na produção de trigo, principalmente com a expansão de trigo irrigado na região Centro-oeste, e uma redução na produção da mandioca, o que indica uma redução da oferta deste produto principalmente para a população de baixa renda.

Com relação às *commodities*, foram analisadas as culturas de soja e milho e outras culturas da cesta básica. Diferentemente do que foi observado em relação às análises estatísticas dos dados do MAPA, ao aplicar modelos agrometeorológicos alimentados por dados dos modelos Climáticos do CIMP6 do IPCC, não haverá ganho de produtividade para nenhuma cultura em nenhum bioma. Por ordem de intensidade de perda de produtividade, a Amazônia será o bioma mais afetado, seguido do Cerrado, depois Caatinga e finalmente Pampa e Mata atlânticas. As

condições para que isso aconteça é não considerar nenhuma medida de adaptação dos sistemas de produção nestes biomas.

Entretanto, considerando a adoção de sistemas de produção integrados, a situação pode ser revertida e a oferta de alimentos ampliada.

Em outro momento, quando analisada a situação das pastagens degradadas, que podem ser revertidas em áreas de produção integrada, foram identificados 2.390 municípios com pastos degradados, totalizando 94 milhões de hectares degradados ou medianamente degradados. Destes, 22,5 milhões de hectares, distribuídos em 432 municípios, são considerados prioritários para recuperação em três níveis: i) municípios com até 30 mil hectares de pastos degradados; ii) municípios com até 45 mil; e iii) municípios com até 60 mil hectares. Segundo os critérios de priorização, este seria o montante final que poderia ser convertido no sistema ILPF, injetando na produção agrícola, ainda que potencialmente, 202 milhões de toneladas de grãos (com Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta) e estimativamente, mais 10 milhões de cabeças com peso de abate de 7 arrobas.

Isso significa que de uma situação de alta vulnerabilidade da agricultura, e consequentemente da produção de alimentos, as ações de adaptação dos sistemas de produção a modelos mais equilibrados são uma grande oportunidade para o Brasil, se manter num alto patamar de oferta de alimentos, considerando as *comodities* e os produtos da cesta básica. Assim, é imperativo que o agronegócio brasileiro adote práticas que promovam a qualidade e a quantidade de oferta de alimentos, com aderência aos mercados externos. Os grandes desafios para reduzir os impactos das mudanças climáticas seriam: Eliminar o desmatamento. Eliminar as queimadas, reduzir o uso de combustíveis fosseis, mudar o modelo de produção agrícola, para modelos mais equilibrados, buscar cada vez mais a adoção de sistemas integrados de produção agrícola como ILP, ILPF, SAF, e recuperar uma imensa área de pastos degradados

REFERÊNCIAS

- Abrahão, G. M., & Costa, M. H. (2018). Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: The rise (and possible fall) of double-cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.031>

- Arantes, N. E.; Souza, P. I. de M. de. Cultura da soja nos cerrados. Piracicaba: Potafos, 1993. 535p. *Simposio sobre a cultura da soja nos Cerrados*, Uberaba, 1992.
- Assad, E. D. (2021). Sistemas agrícolas adaptados às mudanças climáticas. *Ciência e Cultura*, 73(1), 35–40. <https://doi.org/10.21800/2317-66602021000100007>
- ASSad, E. D. et al. (2016) Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira as mudanças climáticas . Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança clima no Brasil, v.4, p.127-88.
- Assad, E. D., & Assad, M. L. R. C. L. (2024). Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. *Estudos Avançados*, 38(112), 271–292. <https://doi.org/10.1590/S0103-4014.202438112.015>
- Assad, E. D., Marin, F. R., Evangelista, B. A., & Cunha, G. R. (2016). Agricultura. In PBMC (Ed.), *Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas* (Vol. 2, p. 339–375). Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.
- Assad, E. D., Pinto, H. S., Zullo Junior, J., & Evangelista, B. A. (2013). Impacto das mudanças climáticas nos riscos de produção agrícola no Brasil. In M. A. Nobre (Ed.), *Mudanças climáticas e agricultura no Brasil*. Embrapa.
- Assad, E. D.; Pinto, H. S. (2008). Aquecimento Global e a Nova Geografia da produção Agrícola no Brasil. Brasília: *Embaixada Britânica*, v.1. 82p.
- Assad, E.D.; Lopes-Assad, M.L. (2024) Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. *USP Estudos avançados* 38 (112), 2024
- Baethgen, W. Climate Risk Management for Adaptation to Climate Variability and Change. CROP SCIENCE, VOL. 50, MARCH–APRIL 2010
- Borges et al (2025) Perspectivas 2025. <https://portalibre.fgv.br/node/11106>
- Brasil (2020). Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 531 p.
- Brasil. 2021 Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Histórico de perdas na agricultura brasileira : 2000-2021 / Secretaria de Política Agrícola . – Brasília : MAPA/AECS, 2022. ISBN: 978-85-7991-185-9
- Buinain, A.M. 2025. Soja no Brasil: controvérsias em debate. <https://jornal.unicamp.br/artigo/2025/07/30/soja-no-brasil-controv%C3%A9rsias-em-debate/> 3 p.
- Camilo, J. A., de Lelis Teixeira de Andrade, C., Amaral, T. A., Tigges, C. H. P., de Melo, M. L. A., Chan, C. S., & Garcia y Garcia, A. (2018). Impact of climate change

on maize grown in the Brazilian cerrado. *ASABE 2018 Annual International Meeting*. <https://doi.org/10.13031/AIM.201800967>

CEMADEN. (2024c). Cemaden registra recorde de alertas e mais de 1,6 mil ocorrências de desastre no Brasil em 2024. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/noticias/cemaden-registra-recorde-de-alertas-e-mais-de-1-6-mil-ocorrencias-de-desastre-no-brasil-em-2024>

Acesso em: 20 de junho de 2025.

Collins, W. J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney, N.; Halloran, P.; Hinton, T.; Hughes, J.; Jones, C. D.; Joshi, M.; Liddicoat, S.; Martin, G.; O'connor, F.; Rae, J.; Senior, C.; Sitch, S.; Totterdell, I.; Wiltshire, A.; Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051–1075, <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>.

Confederação Nacional de Municípios (CNM). (2024). Panorama dos desastres no Brasil: 2013 a 2023 (Estudo Técnico nº 202405). https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2024/Estudostecnicos/202405_ET_Panorama_Desastres_Brasil_2013_a_2023.pdf

Acesso em: 20 de junho de 2025.

Contag, Observatório do Clima. (2025). Agricultura familiar e os sistemas alimentar remoção de carbono e transição justa São José dos Pinhais, PR. Seven Editora. 50p DOI: 10.56238/livrosindi202507-001

Costa, F. R. C., Marengo, J. A., Albernaz, A. L. M., Cunha, A. P., Cuvi, N., Espinoza, J.-C., Ferreira, J., Jimenez-Muñoz, J. C., Páez, M. B., Carramaschi de Algão Querido, L., & Schöngart, J. (2024a). *Policy Brief: Droughts in the Amazon*. <https://doi.org/10.55161/LVYB6857>

Dantas, A.A.A.; CARVALHO, L.G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências em Lavras, MG. (2007). *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v.31, n.6, p.1862-1866. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039>.

FAO. 2023. Food Outlook – Biannual report on global food markets. Food Outlook, November 2023. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc8589en>

Gondim, R. S.; Fuck Júnior, S. C. de F.; Evangelista, S. R. M.; Castro, M. A. H. de; Teixeira, A. dos S. (2011). Impacto das mudanças climáticas na evapotranspiração em nível de Bacia Hidrográfica utilizando um Sistema de Informações Geográficas.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística | PAM Produção Agrícola Municipal (2022). Série histórica. Acessado em 10 de junho de 2024. Disponível em: ipeadata.gov.br.

Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., & Oliveira, U. de. (2024). Climate risks to soy-maize double-cropping due to Amazon deforestation. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/JOC.8381>

- Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M., & Börner, J. (2021). Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications* 2021 12:1, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>
- Liddicoat, S.; Jones, C.; Robertson, E. 2013 CO₂ Emissions Determined by HadGEM2-ES to be Compatible with the Representative Concentration Pathway Scenarios and Their Extensions. *Journal of Climate*, 26(13), 4381–4397. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00569.1>
- Lindoso, D.P., Dalboni Rocha, J., Debortoli, N., Ibiapina Parente, I., Eiró, F., Bursztyn, M., Rodrigues-Filho, S., Hutton, C., Boulanger, J.-P., Lindoso, D. P., Rocha, J. D., Debortoli, N., Bursztyn, M., Rodrigues-Filho, S., & Parente, I. I. (2014). Integrated assessment of smallholder farming's vulnerability to drought in the Brazilian Semi-arid: a case study in Ceará. *Climatic Change*, 127, 93–105. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1116-1>
- Litre, G., & Bursztyn, M. (2015). Climatic and socio-economic risks perceptions and adaptation strategies among livestock family farmers in the pampa biome. *Ambiente & Sociedade*, 18(3), 55–80. <https://doi.org/10.1590/1809-4422A-SOC668V1832015>
- Manzatto, C.V. 2020. Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas parciais / Celso Vainer Manzatto ... [et al.]. –Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. PDF (35p.) – (Documentos / Embrapa Meio Ambiente, 1516-4691 ; 122).
- Macena *et al.* Effects of agricultural management and of climate change on N₂O emissions in an area of the Brazilian Cerrado: Measurements and simulations using the STICS soil-crop model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 363, 108842. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880923005017?via%3Dihub>
- Marcos Junior et al. (2018). Classificação Climática de Thornthwaite para o Brasil com Base em Cenários de Mudanças Climáticas do IPCC-AR5 Rev. bras. meteorol. 33 (4) • Oct-Dec 2018 • <https://doi.org/10.1590/0102-7786334007>
- Martin, G.M.; Bellouin, N.; Collins, W.J.; Culverwell, I.D.; Halloran, P.R.; Hardiman, S.C.; Hinton, T.J.; Jones, C.d.; McDonald, R.E.; McLaren, A.J.; O'connor, F.M.; Roberts, M.J.; Rodriguez, J.M.; Woodward, S.; Best, M.J.; Brooks, M.E.; Brown, A.R.; Butchart, N.; Dearden, C.; Derbyshire, S.H.; Dharssi, I.; Doutriaux-Boucher, M.; Edwards, J.M.; Falloon, P.D.; Gedney, N.; Gray, L.J.; Hewitt, H.T.; Hobson, M.; Huddleston, M.R.; Hughes, J.; Ineson, S.; Ingram, W.J.; James, P.M.; Johns, T.C.; Johnson, C.E.; Jones, A.; Jones, C.P.; Joshi, M.M.; Keen, A.B.; Liddicoat, S.; Lock, A.P.; Maidens, A.V.; Manners, J.C.; Milton, S.F.; Rae, J.G.L.; Ridley, J.K.; Sellar, A.; Senior, C.A.; Totterdell, I.J.; Verhoef, A.; Vidale, P.L.; Wiltshire, A. (2011) The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geosci Model Dev* 4(3):723–757. doi: 10.5194/gmd-4-723-2011, 2011

Milhorance, C., Sabourin, E., le Coq, J. F., & Mendes, P. (2020). Unpacking the policy mix of adaptation to climate change in Brazil's semiarid region: enabling instruments and coordination mechanisms. *Climate Policy*, 20(5), 593–608. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1753640>

Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (2024). Conversão de pastagens degradadas em sistemas de produção agropecuários e florestas sustentáveis. Plano de priorização de áreas e estimativa de investimentos. GPP (Grupo de Políticas Públicas - Esalq/USP) Deflo/SDI/Mapa (Departamento de Reforestamento e Recuperação de Áreas Degradadas Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável, Irrigação e Cooperativismo do Ministério da Agricultura e Pecuária). Brasília, 294 P.

Niemeyer, J., & Vale, M. M. (2022). Obstacles and opportunities for implementing a policy-mix for ecosystem-based adaptation to climate change in Brazil's Caatinga. *Land Use Policy*, 122, 106385. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106385>

Niemeyer, J., & Vale, M. M. (2022). Obstacles and opportunities for implementing a policy-mix for ecosystem-based adaptation to climate change in Brazil's Caatinga. *Land Use Policy*, 122, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106385>

OCDE (2025), Perspectivas globais da seca: tendências, impactos e políticas para se adaptar a um mundo mais seco, Publicação da OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/d492583a-en>.

Pereda, P., & Alves, D. (2018). Climate and weather impacts on agriculture: the case of Brazil. *Economia Aplicada*, 22(3), 5–26. <https://doi.org/10.11606/1980-5330/EA119584>

Pires, M. O. (2020). 'Cerrado', old and new agricultural frontiers. *Brazilian Political Science Review*, 14(3), e0004. <https://doi.org/10.1590/1981-3821202000030006>

Ponpong-Nga, P.; Techamahasaranont, J. Effects of climate and land use changes on water balance in upstream in the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Agric. Nat. Resour.* 2016, 50, 310–320.

Ruiz, Francisco et al. Constructing soils for climate-smart mining. *Communications Earth & Environment*, v. 4, p. 1-6, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00862-x>. Acesso em: 26 maio 2024.

Silva, D. S., Arima, E. Y., dos Reis, T. N. P., & Rattis, L. (2023). Temperature effect on Brazilian soybean yields, and farmers' responses. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 21(1). <https://doi.org/10.1080/14735903.2023.2173370>

Sousa, D. M. G. de; Vilela, L.; Rein, T. A.; Lobato, E. Eficiência da adubação fosfatada em dois sistemas de cultivo em um latossolo de Cerrado. In: Congresso-

Brasileiro de ciência do solo, 26., 1997, Rio de Janeiro. Informação, globalização, uso do solo Rio de Janeiro: SBCS, 1997.

Tanure, T. M. do P., Miyajima, D. N., Magalhães, A. S., Domingues, E. P., & Carvalho, T. S. (2020a). The Impacts of Climate Change on Agricultural Production, Land Use and Economy of the Legal Amazon Region Between 2030 and 2049. *EconomIA*, 21(1), 73–90. <https://doi.org/10.1016/J.ECON.2020.04.001>

Tanure, T. M. do P., Miyajima, D. N., Magalhães, A. S., Domingues, E. P., & Carvalho, T. S. (2020b). The Impacts of Climate Change on Agricultural Production, Land Use and Economy of the Legal Amazon Region Between 2030 and 2049. *EconomIA*, 21(1), 73–90. <https://doi.org/10.1016/J.ECON.2020.04.001>

Torres, Roger Rodrigue. Análise de incertezas em projeções de mudanças climáticas na América do Sul. 2014. 271f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 2014.

Vilela, L. 2019. XXI CBAGRO, Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. MCTI-2020- Quarto Inventário Nacional de Emissões e remoções antrópicas de Gases de efeito estufa.

Xavier, A. C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, v.42, n.16, p.8390-404, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7731> 2022.

Zilli, M., Scarabello, M., Soterroni, A. C., Valin, H., Mosnier, A., Leclère, D., Havlík, P., Kraxner, F., Lopes, M. A., & Ramos, F. M. (2020). The impact of climate change on Brazil's agriculture. *Science of The Total Environment*, 740, 139384. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139384>