

# "Análise Territorial para o Desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil"

*Plano de Ação Imediata da Agricultura Irrigada no Brasil para o período 2020-2023*

---

## Execução



## Contratante:



## Colaboração técnica:



---

**Agosto de 2020**

## EXECUÇÃO

### **Ministério de Desenvolvimento Regional MDR**

*Ministro de Estado*  
Rogério Marinho

### **Secretaria Nacional de Mobilidade e Desenvolvimento Regional e Urbano Secretário**

Tiago Pontes Queiroz

### **Departamento de Desenvolvimento Regional e Urbano**

Diretora  
Adriana Melo Alves

### **Coordenação-Geral de Agricultura Irrigada**

Coordenador-Geral  
Frederico Cintra Belém

Coordenadores

Antônio Felipe Guimarães Leite  
Valdir Juswiak

Assistente

Rafael José da Silva

### **Grupo de Políticas Públicas – ESALQ**

#### **Coordenação Geral**

Durval Dourado Neto

#### **Equipe de execução**

Adauto B. Rocha Junior  
Alberto G.O.P Barretto  
Ana L. Sbitkowski Chamma  
Arthur Nicolaus Fendrich  
Giovani W. Gianetti  
José Lucas Safanelli  
Marcela Almeida de Araujo  
Naila de Freitas Takahashi  
Pedro Alves Quilici Coutinho  
Rodrigo Fernando Maule  
Sergio Paganini Martins  
Simone Beatriz Lima Ranieri

#### **PCT UTF/BRA/087/BRA MDR/FAO**

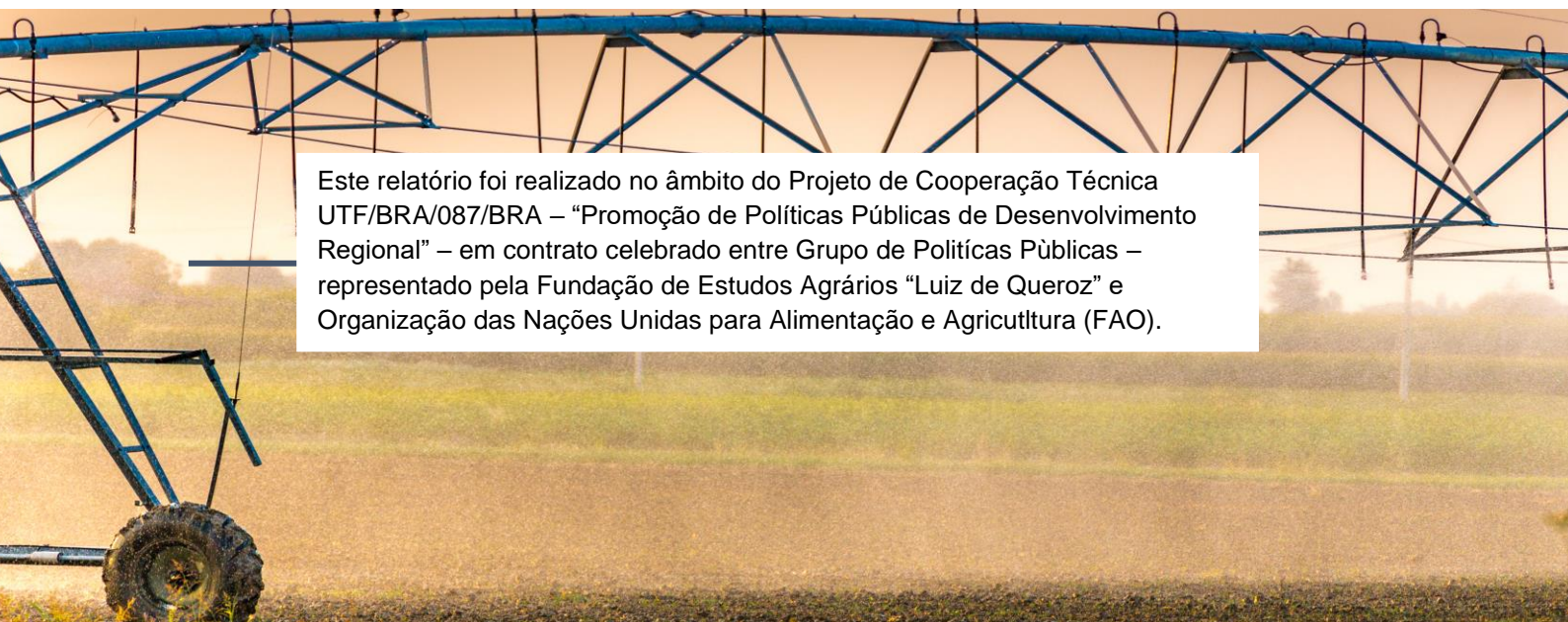
Diretora Nacional  
Giuliana de Abreu Correa

Coordenadora Nacional  
Patrícia Silveira dos Santos

## COLABORAÇÃO TÉCNICA

### **Agência Nacional de Águas (ANA)**

Daniel Assumpção Costa Ferreira  
Marco Vinícius Castro Gonçalves  
Mariane Moreira Ravanello  
Teresa Luisa Lima de Carvalho  
Thiago Henriques Fontenelle  
Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares



Este relatório foi realizado no âmbito do Projeto de Cooperação Técnica UTF/BRA/087/BRA – “Promoção de Políticas Públicas de Desenvolvimento Regional” – em contrato celebrado entre Grupo de Políticas Públicas – representado pela Fundação de Estudos Agrários “Luiz de Queiroz” e Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO).

## Plano de Ação Imediata da Agricultura Irrigada no Brasil para o período 2020-2023

### APRESENTAÇÃO

Este documento compõe o estudo “*Plano de Ação Imediata da Agricultura Irrigada no Brasil para o período 2020-2023*”, o qual é uma iniciativa do Grupo de Políticas públicas da ESALQ e da FEALQ junto ao Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR) com apoio da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO). Este é um estudo amplo, decorrente do desdobramento de estudos anteriores<sup>1</sup> que analisaram o potencial da expansão da agricultura irrigada no território brasileiro e que na presente ocasião objetiva desenvolver material técnico para subsidiar um plano de ação imediata, com proposição de medidas que visem a implementação das iniciativas necessárias à atuação do Governo Federal para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil, para o período de 2020-2023, servindo, portanto, de subsídio às ações do MDR.

Este documento está dividido em sete partes. O primeiro capítulo faz uma introdução geral acerca da importância de políticas públicas no contexto do desenvolvimento rural sustentável e da análise territorial como ferramenta indispensável na condução de estratégias voltadas a agricultura irrigada no Brasil e o papel deste estudo neste contexto.

O segundo capítulo descreve os pressupostos iniciais adotados como premissas para desenvolvimento deste estudo, bem como as variáveis adotadas para compor uma variável territorial de irrigação robusta, com destaque às melhorias e o tratamento que cada variável recebeu para integrar o modelo, resultando em maior robustez de métodos para sua estimação e melhor resolução espacial dos resultados.

Os procedimentos metodológicos para obtenção da área adicional irrigável no Brasil são tratados no terceiro capítulo. Para o alcance deste objetivo, o capítulo está dividido em três eixos de processamento: (i) o primeiro componente refere-se área agricultável – por meio da aplicação de filtros para a remoção de áreas com restrições físicas e ambientais sobre o mapa de uso da terra com áreas consolidadas de agricultura e pastagem; (ii) o segundo refere-se à demanda hídrica, baseada na simulação do balanço hídrico de quatro diferentes culturas - milho, feijão, arroz e cana-de-açúcar, na estimativa da vazão unitária de projeto e na contabilização da disponibilidade hídrica da microbacia; e (iii) o terceiro eixo refere-se à disponibilidade hídrica - a qual apresenta a quantidade de água disponível à agricultura irrigada atualmente no território brasileiro.

---

<sup>1</sup> “*Análise territorial para o desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil*” - Estudo realizado pela FEALQ no âmbito do Projeto de Cooperação Técnica IICA/BRA/08/002, sob demanda do então Ministério da Integração (MI). Finalizado em 2015.

São apresentados no capítulo quatro os resultados relacionados a **área adicional irrigável**, que por sua vez representa as áreas com disponibilidade hídrica para adoção da irrigação, já descontadas as áreas irrigadas atualmente. Os resultados apresentados distinguem as com potencial de **intensificação de agricultura de sequeiro através da irrigação** e as áreas com potencial de **expansão da agricultura irrigada sobre pastagens consolidadas**, considerando a disponibilidade hídrica superficial no território. Além disso, são mostrados os resultados de área adicional irrigável com base na água subterrânea disponível.

O capítulo cinco apresenta a consolidação das **classes territoriais de agricultura irrigada**, frutos de debates realizados junto à equipe técnica do MDR e da Agência Nacional de Águas (ANA), cujo objetivo é definir áreas prioritárias para agricultura irrigada no Brasil, com base na interpretação da área adicional irrigável, da área irrigada atual e na disponibilidade de infraestrutura existente. As classes de irrigação geradas foram denominadas como: **desenvolvimento, intensificação, expansão, manutenção e redirecionamento, reserva técnica e outras estratégias**. Essa hierarquização das regiões devem auxiliar as ações do Governo Federal quanto ao direcionamento de programas, planos e projetos que impactem no desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada.

O capítulo seis, por sua vez, apresenta apresenta as principais considerações acerca deste documento e dos resultados obtidos.

***Profº. Durval Dourado Neto (Coordenador)***

## SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	3
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. CONCEITOS E VARIÁVEIS DA ANÁLISE TERRITORIAL</b> .....	13
<b>2.1 Pressupostos do estudo</b> .....	13
<b>2.2 Variáveis do estudo</b> .....	16
2.2.1 <i>Uso e cobertura da terra</i> .....	17
2.2.2 <i>Aptidão Agrícola ou do meio físico</i> .....	22
2.2.3 <i>Infraestrutura para produção agrícola</i> .....	37
2.2.4 <i>Dinâmica da agricultura irrigada</i> .....	43
<b>3. VARIÁVEL TERRITORIAL DE IRRIGAÇÃO</b> .....	50
<b>3.1 Área agricultável de uso consolidado</b> .....	52
<b>3.2 Demanda hídrica</b> .....	54
3.2.1 <i>Índice de Satisfação à Necessidade de Água e decêndio de semeadura</i> .....	55
3.2.2 <i>Evapotranspiração potencial da cultura de interesse</i> .....	66
3.2.3 <i>Vazão unitária de projeto</i> .....	70
3.2.4 <i>Método de alocação das vazões unitárias</i> .....	71
<b>3.3 Disponibilidade hídrica superficial e cálculo da área adicional irrigável de intensificação e expansão</b> .....	77
3.3.1 <i>Procedimentos para cálculo da área adicional irrigável com água superficial</i> .....	80
<b>3.4. Disponibilidade hídrica subterrânea e área adicional irrigável</b> .....	83
3.4.1 <i>Procedimentos para cálculo da área adicional irrigável com água subterrânea</i> .....	83
<b>4. POTENCIAL DE ADOÇÃO DA AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL</b> .....	86
<b>4.1 Resultados da Área adicional Irrigável – água superficial</b> .....	86
<b>4.2 Resultados da Área adicional Irrigável – água subterrânea</b> .....	91
<b>4.3 Área Adicional Irrigável e Área irrigável</b> .....	95
<b>5. HIERARQUIZAÇÃO DE REGIÕES PRIORITÁRIAS PARA A AGRICULTURA IRRIGADA</b>	101
<b>5.1 Indicador de infraestrutura</b> .....	103
<b>5.2 Área irrigada atual</b> .....	105
<b>5.3 Área adicional irrigável</b> .....	106
<b>5.4 Classes de agricultura irrigada</b> .....	109
<b>5.5 Aptidão do meio físico e classes de agricultura irrigada</b> .....	115
<b>5.6 Análise descritiva das classes de agricultura irrigada</b> .....	117
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	123
<b>ANEXOS</b> .....	125

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Distribuição das áreas de uso da terra .....	20
<b>Tabela 2.</b> Limites do período crítico para a culturas anuais e cultura genérica, em dias após a semeadura (DAS).....	31
<b>Tabela 3.</b> Duração de ciclo, duração das fases fenológicas e coeficientes de cultura de referência .....	32
<b>Tabela 4.</b> Área irrigada (ha) por unidade da federação .....	45
<b>Tabela 5.</b> Parâmetros de cultura do Milho (c=1) .....	57
<b>Tabela 6.</b> Intervalos fenológicos e coeficientes de cultura para as culturas: arroz, cana-de-açúcar, feijão e milho. ....	59
<b>Tabela 7.</b> Intervalo para o período crítico das culturas em função dos dias após a semeadura (DAS). ....	59
<b>Tabela 8.</b> Valores, em hectares, da área adicional irrigável de intensificação e expansão no Brasil .....	87
<b>Tabela 9.</b> Valores, em hectares, da área adicional irrigável com base na água subterrânea disponível .....	93
<b>Tabela 10.</b> Valores, em hectares, da área adicional irrigável (AAI), área irrigada e área irrigável no Brasil .....	96
<b>Tabela 11.</b> Lógica de combinação das variáveis para composição das classes de agricultura irrigada .....	111
<b>Tabela 12.</b> Resultados principais da hierarquização da agricultura irrigada .....	118
<b>Tabela 13.</b> Resultados da hierarquização da agricultura irrigada para os estados e grande regiões brasileiras. ....	120
<b>Tabela 14.</b> Índice limites das fases fenológicas para cultura genérica e seus respectivos coeficientes de cultura (Kc).....	140
<b>Tabela 15.</b> Estimção do saldo de radiação (Rn, MJ m-2 d-1) por modelos alternativos. ....	153
<b>Tabela 16.</b> Estimção do fluxo de calor (G, MJ m-2 d-1) no solo por modelos alternativos. ...	154
<b>Tabela 17.</b> Estimção da velocidade do vento a 2 m de altura (U2, m s-1). ....	155
<b>Tabela 18.</b> Estimção da radiação solar global (Qg, MJ m-2 d-1) por modelos alternativos. .	155
<b>Tabela 19.</b> Parâmetros empíricos a e b determinados por intermédio de análise de regressão linear para diferentes regiões para a estimção da radiação global.....	155
<b>Tabela 20.</b> Tabela de conversão de radiação.....	155

## ÍNDICE DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Descrição das bases de dados utilizadas.....	18
<b>Quadro 2.</b> Reclassificação do uso da terra do mapa G (Mapbiomas 4.1).....	19
<b>Quadro 3.</b> Critérios para avaliação da aptidão para culturas agrícolas em função da altitude e declividade .....	28
<b>Quadro 4.</b> Variáveis relacionadas a recursos hídricos e dados climáticos .....	44
<b>Quadro 5.</b> Chave de decisão sobre métodos de irrigação para posterior alocação de vazão unitária de projeto.....	73
<b>Quadro 6.</b> Classificação taxonômica (WRB/FAO, 2014) fornecida pelo mapa do <i>SoilGrids</i> , correlação com o sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS, 2018), breve descrição da classe taxonômica, e classe de aptidão agrícola considerando a drenagem. ....	138
<b>Quadro 7.</b> Lógica de combinação das variáveis utilizadas para a obtenção das Classes Territoriais Rurais .....	143
<b>Quadro 8.</b> Classes territoriais e conceito das condições relacionadas ao nível de desenvolvimento e de aptidão .....	144
<b>Quadro 9.</b> Classes de caracterização rural (CR) resultantes da combinação entre concentração de pobreza (CP) e o índice de aptidão agrícola e infraestrutura (IAI).....	150

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representação esquemática da área ocupada pelos grupos de uso da terra no Brasil .....	15
<b>Figura 2.</b> Mapa de uso da terra para o Brasil .....	20
<b>Figura 3.</b> Distribuição espacial das áreas de preservação permanente (APP) no Brasil .....	21
<b>Figura 4.</b> Índice de qualidade do solo (IQS) para culturas agrícolas .....	27
<b>Figura 5.</b> Índice de qualidade do relevo (IQR) para culturas agrícolas .....	29
<b>Figura 6.</b> Curva logística utilizada para a interpretação e reclassificação do ISNA .....	34
<b>Figura 7.</b> Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA) para culturas agrícolas .....	34
<b>Figura 8.</b> Índices de qualidade do clima (IQC) para culturas agrícolas.....	35
<b>Figura 9.</b> Índice de aptidão do meio físico para culturas agrícolas (IAMF) .....	36
<b>Figura 10.</b> Índice de aptidão do meio físico para culturas agrícolas (IAMF) representado em <i>quantis</i> : muito baixo $\leq 0,2$ ; $0,2 < \text{baixo} \leq 0,4$ ; $0,4 < \text{médio} \leq 0,6$ ; $0,6 < \text{alto} \leq 0,8$ ; muito alto $> 0,8$ .....	37
<b>Figura 11.</b> Indicador da proximidade aos modais de transporte rodo e ferroviário .....	40
<b>Figura 12.</b> Indicador da proximidade às redes de distribuição de energia de alta e média tensão, e subestações .....	41
<b>Figura 13.</b> Indicador da capacidade de armazenamento dentro da região rural.....	42
<b>Figura 14.</b> Infraestrutura calculada pela média dos componentes energia, transporte e armazenamento.....	43
<b>Figura 15.</b> Distribuição espacial das áreas irrigadas atualmente no Brasil por microbacia .....	46
<b>Figura 16.</b> Distribuição espacial dos valores de vazão de retirada para consumo humano no meio urbano e no meio rural.....	47
<b>Figura 17.</b> Distribuição espacial dos valores de vazão de retirada para indústria de transformação e para mineração, respectivamente.....	47
<b>Figura 18.</b> Distribuição espacial dos valores de vazão de retirada para dessedentação animal e para a irrigação agrícola, respectivamente .....	48
<b>Figura 19.</b> Distribuição da disponibilidade hídrica (Q-95) .....	49
<b>Figura 20.</b> Distribuição espacial da vazão subterrânea ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).....	49
<b>Figura 21.</b> Representação esquemática dos três eixos que compõem a variável territorial de irrigação.....	50
<b>Figura 22.</b> Representação esquemática da composição do eixo <b>área agricultável</b> .....	52
<b>Figura 23.</b> Dados utilizados para a geração da área agricultável .....	53
<b>Figura 24.</b> Área agricultável no Brasil, considerando as áreas consolidadas com agricultura (mapa da esquerda) ou com pastagem (mapa da direita).....	54
<b>Figura 25.</b> Síntese dos procedimentos para estimativa da demanda hídrica.....	55
<b>Figura 26.</b> Evolução da curva de coeficiente de cultura ao longo das fases fenológicas das culturas: arroz, cana-de-açúcar, feijão e milho.....	60
<b>Figura 27.</b> Curva genérica de evolução do Kc ao longo das fases fenológicas .....	60
<b>Figura 28.</b> Distribuição espacial e histograma do dêcendio de plantio de referência para cana-de-açúcar .....	61
<b>Figura 29.</b> Esquema de obtenção do período crítico a partir do decêndio de plantio para cana-de-açúcar .....	62
<b>Figura 30.</b> Distribuição espacial do dêcendio de plantio de referência para milho e feijão, respectivamente. ....	63



<b>Figura 31.</b> Histograma do dêcêndio de semeadura de referência para as culturas de milho e feijão, respectivamente.....	63
<b>Figura 32.</b> Esquema de obtenção do período crítico a partir do decêndio de plantio para feijão e milho.....	64
<b>Figura 33.</b> Dêcêndio de plantio de referência para arroz.....	65
<b>Figura 34.</b> Esquema de obtenção do período crítico a partir do decêndio de semeadura da cultura de arroz. ....	66
<b>Figura 35.</b> Evapotranspiração potencial para cana-de-açúcar, feijão, milho e arroz.....	67
<b>Figura 36.</b> Histogramas dos resultados obtidos de evapotranspiração potencial de cultura.....	69
<b>Figura 37.</b> Distribuição espacial da vazão unitária e projeto para as culturas da cana-de-açúcar, feijão e milho com sistema de irrigação pressurizado e arroz com sistema de irrigação de superfície.....	71
<b>Figura 38.</b> Procedimento de alocação de vazão unitária dividido em áreas de intensificação (áreas agrícolas) e expansão (áreas de pastagem).....	74
<b>Figura 39.</b> Distribuição espacial da vazão unitária de projeto média para cada microbacia sobre áreas passíveis de intensificação (áreas agrícolas) e de expansão (áreas de pastagem) ( $m^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ ).....	76
<b>Figura 40.</b> Distribuição espacial da demanda hídrica para intensificação e para expansão por microbacia.....	77
<b>Figura 41.</b> Distribuição espacial dos valores de vazão de retirada de todos os usos consuntivos. ....	79
<b>Figura 42.</b> Distribuição espacial vazão remanescente por microbacias, conforme uso de dados da $Q_{95}$ versus usos consuntivos.....	80
<b>Figura 43.</b> Distribuição espacial do nível de comprometimento da $Q_{95}$ considerados os descontos para intensificação e expansão, consecutivamente. ....	82
<b>Figura 44.</b> Distribuição espacial da área adicional irrigável de intensificação.....	90
<b>Figura 45.</b> Distribuição espacial da área adicional irrigável de expansão.....	90
<b>Figura 46.</b> Distribuição espacial da área adicional irrigável total, com base na água superficial.....	91
<b>Figura 47.</b> Distribuição espacial da área adicional irrigável com água subterrânea.....	94
<b>Figura 48.</b> Distribuição espacial da área adicional irrigável total com base na água superficial e subterrânea. ....	98
<b>Figura 49.</b> Distribuição espacial da área irrigável total com base na área adicional irrigável total e área irrigada atual.....	99
<b>Figura 50.</b> Variáveis utilizadas para definição das classes de agricultura irrigada.....	102
<b>Figura 51.</b> Indicador de infraestrutura utilizado na classificação da agricultura irrigada.....	105
<b>Figura 52.</b> Distribuição das microbacias com presença significativa de agricultura irrigada ...	106
<b>Figura 53.</b> Distribuição espacial da área adicional irrigável pela intensificação em agricultura de sequeiro disponível no nível de microbacia.....	108
<b>Figura 54.</b> Área adicional irrigável pela expansão sobre áreas de pastagem disponível no nível de microbacia.....	109
<b>Figura 55.</b> Classes de agricultura irrigada no território brasileiro categorizado no nível de microbacia.....	112
<b>Figura 56.</b> Classes de aptidão do meio físico considerados os componentes Solo e Relevo.....	115
<b>Figura 57.</b> Classes de agricultura irrigada dentro da categoria de média e alta (conjuntamente) aptidão do meio físico.....	116

<b>Figura 58.</b> Classes de agricultura irrigada dentro da categoria de baixa, média e alta aptidão do meio físico .....	117
<b>Figura 59.</b> Classes de agricultura irrigada distribuídas no território nacional .....	122
<b>Figura 60.</b> Representação esquemática do cruzamento das variáveis utilizadas para a obtenção das Classes Territoriais Rurais .....	142
<b>Figura 61.</b> Classes de concentração de pobreza para o território brasileiro. ....	148
<b>Figura 62.</b> Índice de aptidão agrícola e infraestrutura (IAI) categorizado em três classes. ....	149
<b>Figura 63.</b> Caracterização rural do território brasileiro. ....	150

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta grande potencial para adoção da agricultura irrigada, seja devido à sua extensão territorial ou ao conjunto de fatores físico-climáticos favoráveis ao seu desenvolvimento. Neste sentido, políticas públicas ou incentivos privados voltados à adoção da agricultura irrigada são estratégicos para a agricultura no país, seja para aumentar a oferta de produtos, seja para melhorar os níveis de produção, produtividade, renda e emprego, tanto no meio rural como para os setores urbano-industriais vinculados, direta ou indiretamente, ao complexo de atividades da agricultura irrigada. Além disso, a irrigação tem potencial para contribuir para a preservação dos biomas, ao reduzir a pressão pela expansão da fronteira agrícola pela via do aumento da produtividade das áreas em produção.

A elaboração de políticas públicas voltadas ao incremento das áreas irrigadas no Brasil e ao uso sustentável dos recursos hídricos nessas localidades deve levar em conta o conhecimento das especificidades regionais do território, suas demandas, seus problemas e suas potencialidades. Abordar estas questões de forma espacializada e quantitativa tem sido uma preocupação do Governo Federal que, desde 2013, através do então Ministério da Integração Nacional, demandou o estudo “Análise territorial para o desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil”, seguido pelo estudo demandado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), “Promoção da Gestão Integrada e no Uso Sustentável dos Recursos Hídricos no Meio Rural”. Ambos os estudos foram desenvolvidos pelo Grupo de Políticas Públicas da ESALQ/USP, via Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ). Os estudos apontaram espacialmente variáveis que interferem na configuração e desempenho das políticas voltadas à agricultura irrigada, sendo indicadas prioridades de ação regionalizadas para avaliação e aplicação das políticas.

O atual Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) assumiu o desafio de aperfeiçoar os instrumentos e procedimentos utilizados nos estudos anteriores, se valendo de dados atualizados, bem como de intensificar os esforços já iniciados, avançando na espacialização das políticas públicas a serem formuladas. O resultado esperado do presente estudo, “Plano de Ação Imediata da Agricultura Irrigada no Brasil para o período 2020-2023”, é que este seja indutor da adoção de metodologias cada vez mais adequadas à formulação de estratégias, planos e programas que contemplem a diversidade territorial, o aproveitamento sustentável das potencialidades dos recursos disponíveis e das culturas agrícolas, contribuindo para que a agricultura irrigada seja um instrumento harmônico em cada território, promotor do desenvolvimento regional.

Com o objetivo de representar o desenvolvimento e a utilização de técnicas inovadoras para a gestão de políticas públicas relacionadas à agricultura e à irrigação, a realização deste estudo prevê alguns importantes pressupostos iniciais, os quais são apresentados neste documento.

Para o processo de análise e planejamento territorial, a base metodológica deste estudo contemplou modelagem espacial complexa, a partir da sistematização de um conjunto integrado de parâmetros e indicadores capazes de retratar as condições locais e regionais da matriz de produção predominante, do perfil de agricultores, da aptidão agrícola das terras, das restrições ambientais e das potencialidades para a utilização da irrigação no Brasil, de modo integrado.

O estudo realizou uma análise robusta e refinada da chamada “variável territorial de irrigação”, a partir da mensuração do potencial de expansão da agricultura irrigada no Brasil, diferenciando a fração da atual área agrícola de sequeiro que apresenta potencial para ser irrigada (**intensificação**) e as áreas de pastagem com potencial para expansão da produção agrícola por meio do uso da irrigação (**expansão**). Além disso, com o objetivo de servir de apoio às regiões com maior limitação hídrica, este estudo apresenta as áreas potenciais para adoção da agricultura irrigada por meio da água subterrânea.

Por fim, é importante enfatizar que o presente estudo, por meio de modelagem territorial, combinou os resultados da chamada “área adicional irrigável” com variáveis auxiliares presentes no contexto de produção agropecuária, especialmente as relacionadas à infraestrutura disponível. Os padrões resultantes destas combinações auxiliaram na definição de áreas prioritárias para agricultura irrigada. Esta análise poderá ser indutora da formulação de estratégias e da adoção de metodologias adequadas para a definição das intervenções necessárias ao desenvolvimento de cada território, auxiliando na priorização das intervenções relacionadas à agricultura irrigada e na qualificação das ações voltadas ao desenvolvimento e ou expansão da agricultura de base limpa e sustentável.

## 2. CONCEITOS E VARIÁVEIS DA ANÁLISE TERRITORIAL

As políticas públicas voltadas ao espaço de produção agropecuária são extremamente relevantes para a moldar a configuração do território brasileiro. O Brasil, com grande potencial para adoção da agricultura irrigada, demanda por ações planejadas com capacidade de induzir o desenvolvimento sustentável, satisfazendo os interesses coletivos e garantindo equidade de oportunidades.

Essas premissas estão presentes em todo o desenho do estudo. Nesta perspectiva, o presente capítulo apresenta uma contextualização inicial cujo objetivo é proporcionar uma melhor compreensão acerca dos pressupostos metodológicos que nortearam o seu desenvolvimento, bem como o universo de variáveis e informações utilizadas para a sua realização.

### 2.1 Pressupostos do estudo

Para melhor compreensão acerca dos resultados obtidos no âmbito da agricultura irrigada, o presente item sintetiza os pressupostos iniciais em relação ao mapeamento do uso da terra no Brasil. Ou seja, expõe como as classes de uso da terra foram divididas em grupos, de modo a possibilitar o direcionamento dos esforços deste estudo sobre as áreas de maior interesse para irrigação. Apesar da ampla diversidade de usos da terra, para este estudo as classes de uso encontradas nos mapeamentos disponíveis foram agregadas em grupos mais genéricos, que por sua vez foram considerados suficientes para a elaboração da proposta.

De modo a auxiliar o entendimento da subdivisão do território, foi elaborada a **Figura 1**. Nota-se que as divisões englobam cinco grupos de uso da terra, a saber:

- (i) áreas de proteção pública<sup>2</sup> e privada, áreas ocupadas com cidades, infraestrutura e massas d'água (**F<sub>1</sub>** e **F<sub>2</sub>** - sendo **F<sub>2</sub>** referente à Área de Preservação Permanente [APP] e Reserva Legal [RL] segundo critérios definidos na Lei 12.651/2012), e áreas com vegetação nativa utilizável para outros usos (**F<sub>3</sub>**) designadas pela letra **F**;
- (ii) áreas com florestas plantadas (silvicultura) designadas pela letra **S**;
- (iii) áreas de pastagem designadas pela letra **P**;
- (iv) áreas de agricultura designadas pela letra **A** e, por fim,
- (v) áreas designadas pela letra **I**, que são o objeto de análise do presente estudo, e representam as parcelas de cada grupo que possuem potencial para adoção da irrigação (sendo **I<sub>1</sub>** a área de **intensificação** em áreas de agricultura e **I<sub>2</sub>** a área de **expansão** em áreas de pastagem).

Apesar do diagrama da **Figura 1** explorar todas as possibilidades de incremento de área irrigável no território, como premissa inicial deste estudo foram consideradas

---

<sup>2</sup> O conjunto chamado genericamente de áreas de proteção pública envolve as seguintes classes fundiárias: Terras Indígenas, Unidades de Conservação, Áreas Militares, Áreas Quilombolas, Florestas Públicas tipo A não classificadas nas classes anteriores e Terras Públicas Não Destinadas

somente as regiões designadas pelos códigos **I<sub>1</sub>**, e **I<sub>2</sub>**, além da área irrigada atualmente, representada pelo código **I<sub>0</sub>**. Em termos práticos, a adoção dessa premissa limita a abrangência deste estudo apenas às regiões com o uso da terra já consolidado em áreas de agricultura e de pastagem.

Detalhando a descrição apresentada acima, sobre as áreas de agricultura (**A**) consolidadas, existem localidades já irrigadas atualmente (**I<sub>0</sub>**) e localidades com potencial físico para que haja a **intensificação** das práticas de cultivo por meio da irrigação (**I<sub>1</sub>**). Nesse sentido, no âmbito deste estudo, as áreas **I<sub>1</sub>** foram tratadas com maior prioridade (**Figura 1**).

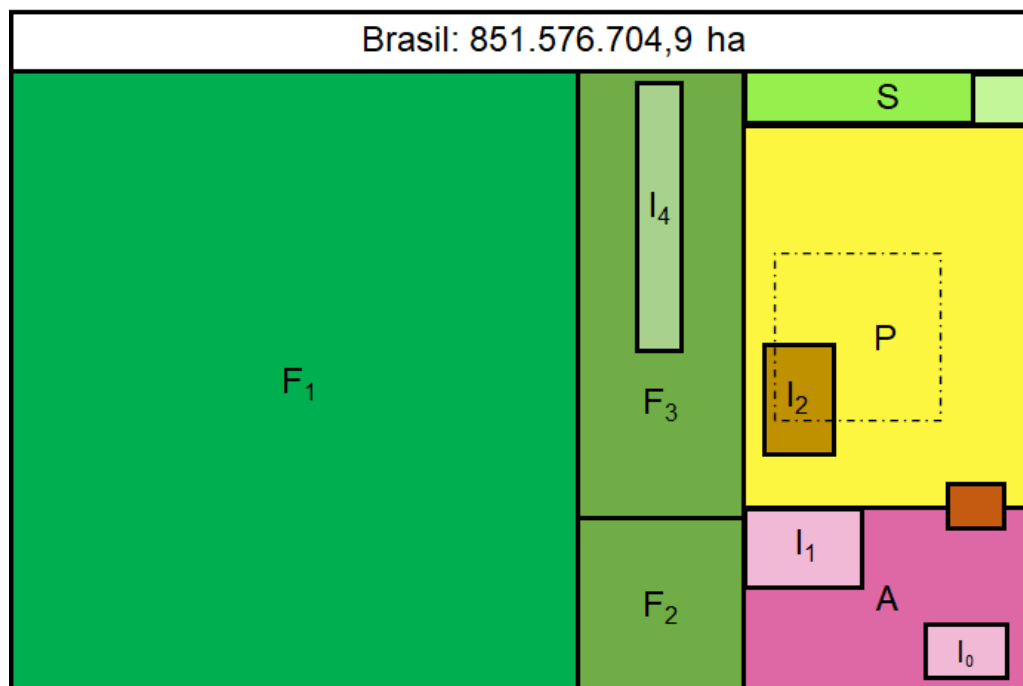
As áreas de pastagem (**P**) consolidadas são compostas por áreas sujeitas e não sujeitas à adoção de irrigação. As sujeitas à adoção de irrigação (por apresentarem potencial físico) são representadas por **I<sub>2</sub>** (**Figura 1**). Tais áreas foram tratadas com prioridade secundária e nomeadas como áreas adicionais irrigáveis em caráter de **expansão**.

Por outro lado, para atender a demanda mundial por produção de alimentos dada a crescente população, foi indicada na **Figura 1** a área de pastagem que pode ser convertida em área com agricultura (retângulo tracejado circunscrito na área de pastagem), onde uma parte pode ser irrigada (**I<sub>2</sub>**). Apesar da figura ilustrar que existe a distinção entre áreas de pastagem sujeitas à **expansão** da agricultura e as áreas não sujeitas, essa diferenciação não foi implementada no âmbito deste estudo. Ou seja, neste estudo a área de pastagem passível de conversão para agricultura por meio da irrigação é a área total de **I<sub>2</sub>**.

Sobre as áreas consolidadas com vegetação nativa legalmente passíveis de conversão para outros usos (**F<sub>3</sub>**), existem localidades que apresentam potencial físico para irrigação, sendo também novas áreas passíveis de abertura. Para esses casos, a **Figura 1** aponta tais áreas sob o código **I<sub>3</sub>**. Nessa situação específica, no âmbito deste estudo, essas áreas foram consideradas de prioridade mínima, e, portanto, não foram contempladas nos cálculos, pois são áreas em que para implementar tal mudança no modal do uso da terra seriam necessários grandes esforços e investimentos, gerando baixo retorno sobre o capital investido. Além disso, esta conversão de uso está em desacordo com os atuais valores da sociedade brasileira e internacional.

Por fim, sobre as áreas consolidadas de florestas plantadas (silvicultura), sob o código **S** (**Figura 1**), de modo análogo, há áreas em que existe o potencial físico para irrigação, designadas pelo código **I<sub>4</sub>** (**Figura 1**). Entretanto, no âmbito deste estudo, tais áreas foram deixadas de lado por sua baixa expressividade em números absolutos.

**Figura 1.** Representação esquemática da área ocupada pelos grupos de uso da terra no Brasil



\* Área de pastagem que pode ser convertida em área de agricultura (retângulo tracejado circunscrito na área de pastagem), onde uma parte pode ser irrigada.

SIGLA	DESCRIÇÃO
F <sub>1</sub>	Área de proteção pública e privada, cidades, massas d'água e infraestrutura
F <sub>2</sub>	Área de Preservação Permanente [APP] e Reserva Legal [RL] segundo critérios definidos na Lei 12.651/2012
F <sub>3</sub>	Área de vegetação nativa utilizável para outros usos
I <sub>4</sub>	Área adicional irrigável em áreas de vegetação nativa utilizáveis para outros usos
S	Área de floresta plantada (Silvicultura)
I <sub>5</sub>	Área adicional irrigável em áreas de floresta plantada (Silvicultura)
P	Área de pastagem
I <sub>2</sub>	Área adicional irrigável em áreas de pastagem (área de <b>Expansão</b> )
A	Área de agricultura
I <sub>1</sub>	Área adicional irrigável em áreas de agricultura (área de <b>Intensificação</b> )
I <sub>0</sub>	Área irrigada
I <sub>3</sub>	Área adicional irrigável com base na água subterrânea

## 2.2 Variáveis do estudo

As variáveis construídas para o estudo abordam diferentes temáticas (social, econômica, ambiental etc.) e enfocam um conjunto de elementos dotados de especificidades, complexidades e abrangências diferenciadas. As variáveis escolhidas foram construídas de modo a serem capazes de definir as dimensões das ações governamentais voltadas para a agricultura irrigada e considerar diferentes elementos na sua construção, quais sejam: (i) a focalização nas especificidades que a agricultura irrigada apresenta; (ii) as dinâmicas sociais e os arranjos produtivos existentes no contexto local e regional; (iii) as aptidões e restrições do meio físico; e (iv) os aspectos circunstanciais que representam oportunidades e barreiras.

Devido à complexidade que cada variável carrega individualmente, amplificada pelas inúmeras combinações possíveis entre elas, é necessária uma macroestrutura de organização das mesmas. Essa organização complexa foi baseada num elemento comum a todas as variáveis envolvidas, possibilitando assim que elas fossem tratadas conjuntamente. Também, buscou-se a simplificação de cada variável, para que os detalhes não atrapalhassem ou ofuscassem a visão do conjunto. Por outro lado, tomou-se o devido cuidado neste estudo para que tal simplificação não distanciasse a composição de cada variável da situação fática verificável, ou seja, que a variável não perdesse a sua vinculação com a realidade.

O elemento comum a todas as variáveis envolvidas é a sua dimensão espacial explícita, ou seja, a territorialidade. Os agricultores não ocupam as terras uniformemente, as aptidões do solo e do clima não são iguais em todos os lugares, os recursos hídricos têm distribuição não homogênea, a disponibilidade de infraestrutura também tende a se concentrar em certas regiões. Todos estes temas podem ser expressos espacialmente, e se agrupados logicamente podem vir a expressar espaços de características comuns, possibilitando uma descrição de fácil compreensão e de rápida assimilação. Este processo foi facilitado pela diferenciação que tais espaços possuem entre si e que se evidenciaram mediante a adequada espacialização das principais variáveis que expressam essa lógica.

Neste estudo, adotou-se como unidade básica de processamento as microbacias da Agência Nacional de Águas (ANA), o que resultou para o Brasil em um número de 404.023 polígonos de processamento com área média de 2.015 hectares, mediana de 980 hectares e área máxima de 675.708 hectares. Dessa forma, cada dimensão aqui tratada foi especializada na escala de microbacia categoria de cada. Da mesma maneira, cada microbacia está associada exclusivamente a apenas um município e apenas a um bioma. Nos casos em que uma microbacia pertencia a dois ou mais municípios, considerou-se o vínculo em relação àquele com maior área relativa da microbacia. Para as variáveis de meio físico, cuja resolução espacial era mais detalhada que o polígono



da microbacia (elementos do clima, atributos de solos e relevo), adotou-se o valor médio da variável.

A consolidação das variáveis para processamento integrado é uma etapa que requer intenso processamento computacional, bem como o desenvolvimento de algoritmos específicos para tratamento de problemas inerentes à harmonização de escalas, agregação e desagregação de dados. Isto é, como a escala de processamento adequada para os cálculos de interesse deste projeto é a microbacia hidrográfica, todas as variáveis calculadas em pixels de 30x30m ou no nível de imóvel rural foram agregadas para essa escala. Similarmente, variáveis calculadas em níveis mais agregados, como os municípios, foram desagregadas para as microbacias.

Nas seções subsequentes será sintetizada cada uma das variáveis utilizadas no modelo territorial de irrigação e na composição das classes territoriais mais à frente. Para tanto, apresentam-se as variáveis finais e de forma oportuna são apontadas as variáveis intermediárias e procedimentos de cálculo, bem como a fonte das informações. Além disso, complementar a este capítulo, no **Anexo I** deste documento é apresentada uma tabela de metadados abrangendo tanto as variáveis de entrada quanto de saída.

### **2.2.1 Uso e cobertura da terra**

#### **Mapa de cobertura da terra no Brasil**

Para a composição do mapa atual do uso da terra no Brasil foi realizada uma compilação de mapas de uso e cobertura do solo já existentes para o território brasileiro. Essas informações são provenientes de bases de dados diversas, de modo que se prezou pelo uso de bases de dados acuradas, amparadas por publicações científicas e atuais para cada região do país.

Nesta compilação foram utilizadas bases de dados de instituições privadas e públicas, de acesso livre ou disponível sob demanda, conforme apresentado no **Quadro 1**.

**Quadro 1.** Descrição das bases de dados utilizadas

ID do mapa	Nome do mapa / Produto	Fonte / Autor	Descrição	Ano	Disponibilidade
A	Áreas de arroz irrigado	CONAB	Áreas de arroz irrigado mapeadas pela CONAB em parceria com a ANA.	2015	Arquivo público
B	<u>Canasat</u>	INPE / Agrosatélite	Mapa da cana-de-açúcar para o centro-sul do Brasil	2015	Disponível mediante requisição a fonte geradora do dado
C	Mapeamento de soja do bioma Amazônia	Agrosatélite	Mapeamento da cultura de soja no bioma Amazônia, para a safra 2016/2017	2016/ 2017	Disponível mediante requisição a fonte geradora do dado
D	Áreas sob irrigação por pivô central	ANA	Mapa da dinâmica de uso e cobertura do solo no Brasil entre os anos 2000, 2010, 2012 e 2014.	2019	Arquivo público
F	<u>Mapeamento da Cobertura Vegetal da Bacia do Alto Paraguai (BAP)</u>	SOS Pantanal, ArcPlan	Monitoramento do uso e ocupação do solo na BAP entre 2002 e 2017.	2017	Disponível mediante requisição a fonte geradora do dado
G	<u>Mapbiomas coleção 4.1</u>	IMAZON, UEFS, APNE, IPAM, SOS Mata Atlântica, ArcPlan, UFRGS, SOS Pantanal, LAPIG/UFG, Agrosatélite, Instituto Tecnológico da Vale	Mapas anuais de cobertura e uso da terra dos biomas do Brasil. Neste trabalho utilizaram-se apenas os dados referentes aos biomas Cerrado e Amazônia	2008 e 2017	Arquivo público

Os procedimentos para elaboração dos mapas de uso do solo foram realizados por meio de algoritmos computacionais escritos na linguagem de programação *R*, utilizando-se da biblioteca de ferramentas espaciais *Raster*. A seguir é apresentado o passo a passo do processamento das camadas de entrada:

- (i) Conversão dos dados de entrada para *rasters* com 30 metros de resolução espacial, alinhados à grade de órbita/ponto do satélite Landsat.
- (ii) O mapa G foi reclassificado com o intuito de reduzir o número de classes disponíveis. No **Quadro 2** são detalhados os agrupamentos das classes de uso do solo.

- (iii) Os mapas de A até G foram compilados em um único processamento, seguindo uma hierarquia de sobreposição entre os mapas.
- (iv) As camadas F e G foram usadas como máscara para definir as áreas agrícolas e áreas de pastagem. Nas áreas agrícolas, as camadas A, B, C e D tomaram prioridade secundária.
- (v) Para a definição das áreas de pastagem, bastou que uma dentre as camadas F e G apontasse para tal uso.
- (vi) Para definir o uso final das áreas agrícolas, o mapa A é o de maior prioridade, seguido pelo mapa B, e assim por diante até o mapa D.
- (vii) Para as classes restantes, foram usadas as classes reclassificadas da camada G.

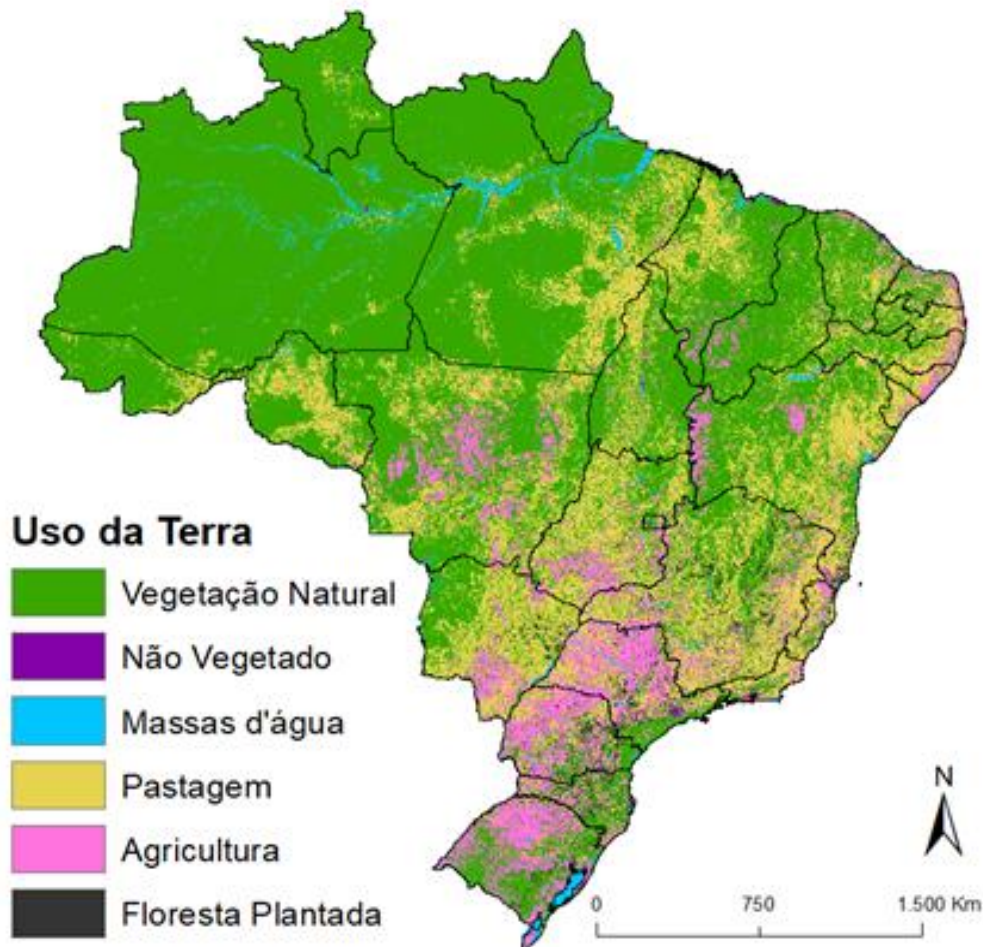
**Quadro 2.** Reclassificação do uso da terra do mapa G (Mapbiomas 4.1)<sup>3</sup>

Classe reclassificada	Classe original
Vegetação Natural	Formação florestal / Formação de savanas / Mangue / Área úmida natural não florestal / Formação campestre / Apicum / Afloramento rochoso / Outra formação não florestal
Pastagem	Pastagem
Agricultura	Agricultura anual e perene / Cultura semiperene / Mosaico de agricultura e pastagem
Florestas plantadas	Florestas plantadas
Área não vegetada	Praia e duna / Infraestrutura urbana / Mineração / Outra área não vegetada
Água	Rio, lago e oceano / Aquicultura

O mapa de uso da terra obtido para o território brasileiro, o qual é utilizado neste estudo, é apresentado na **Figura 2**. Na sequência, a **Tabela 1** sintetiza a distribuição das áreas (em hectares) relacionados aos tipos de usos processados.

<sup>3</sup>Classes:[https://storage.googleapis.com/mapbiomas/mapbiomas-br/v4/download%20\\_%20codigo%20legenda/Códigos%20da%20legenda%20Coleção%204.pdf](https://storage.googleapis.com/mapbiomas/mapbiomas-br/v4/download%20_%20codigo%20legenda/Códigos%20da%20legenda%20Coleção%204.pdf)

**Figura 2.** Mapa de uso da terra para o Brasil



**Tabela 1.** Distribuição das áreas de uso da terra

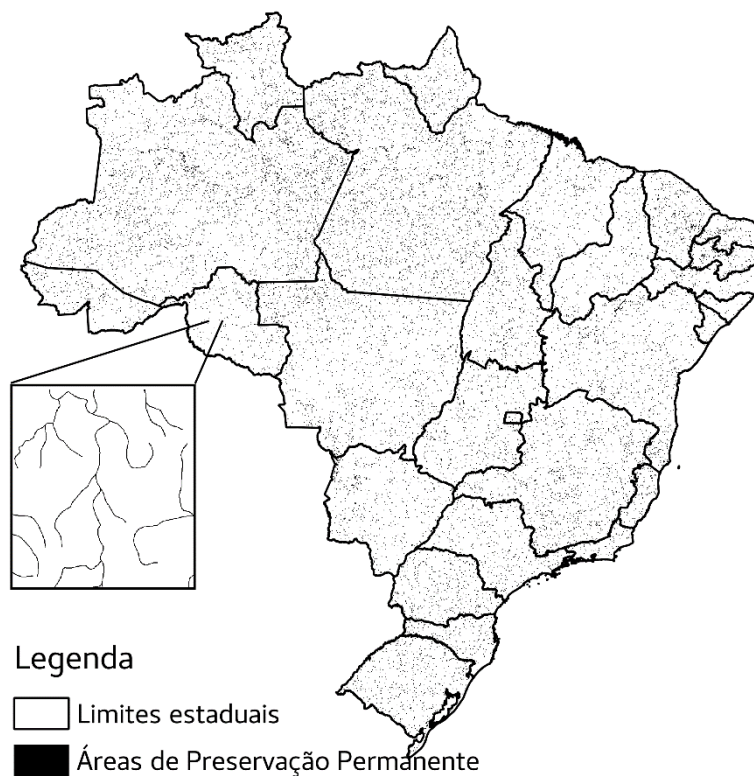
Uso da terra	Área (ha)
Vegetação nativa	558.193.471
Não vegetado	4.841.239
Massas d'água	15.709.709
Pastagem	185.496.810
Agricultura indefinida	51.090.595
Soja	15.391.253
Cana-de-açúcar	8.958.802
Arroz	1.361.996
Pivôs	590.049
Florestas plantadas	8.606.348
<b>Total</b>	<b>850.240.272</b>

## Demais usos e cobertura da terra

Além do mapa de uso da terra processados para este estudo, foram também consolidadas as áreas protegidas do território envolvendo as Unidades de Conservação de Proteção Integral, as Áreas Militares, Terras Indígenas e Territórios Remanescentes de Quilombos. As bases de dados utilizadas para compor esse banco de dados sobre os demais usos e cobertura da terra provém do Ministério do Meio Ambiente, Instituto de Geografia e Estatística (IBGE), Serviço Florestal Brasileiro, Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e Fundação Nacional do Índio (FUNAI). Já a base de Área de Preservação Permanente (APP) foi composta pelos dados do IBGE em todo o Brasil, exceto o estado de São Paulo, onde deu-se preferência pela base do Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, que mapeou o território estadual com 5m de resolução.

A **Figura 3** apresenta a distribuição espacial das Áreas de Preservação Permanente (APP) no Brasil processadas para este estudo.

**Figura 3.** Distribuição espacial das áreas de preservação permanente (APP) no Brasil



## 2.2.2 Aptidão Agrícola ou do meio físico

Indicador desenvolvido pelo Laboratório de Geoprocessamento (GeoLab/ESALQ), apresentado originalmente em Barretto (2013)<sup>4</sup> e aplicado pela primeira vez para análise territorial em escala nacional em Sparovek *et al.* (2015)<sup>5</sup> e em modelos de dinâmica de uso da terra em Freitas *et. al.*, 2018<sup>6</sup>, a aptidão agrícola reflete as condições edafoclimáticas favoráveis para as atividades agropecuárias dominantes. Para o presente estudo, o Modelo de Aptidão Agrícola utilizado pelo Geolab foi atualizado, especialmente quanto às variáveis relacionadas ao Índice de Solo e ao Índice Climático, os quais obtiveram melhorias envolvendo tanto o ganho de escala (melhor resolução espacial), quanto a robustez de métodos para sua estimação.

O modelo original de Barretto (2013) avalia as características do meio físico para estabelecimento de culturas anuais em sistemas mecanizados, considerando as dimensões solo, relevo e clima. Para cada uma das dimensões são calculados índices com base em banco de dados georreferenciados, aplicando-se ferramentas de programação computacional e modelagem espacial. Na dimensão solo e relevo, a avaliação da aptidão segue os princípios apresentados em metodologias consolidadas, *i.e.* “*Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica*” da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA<sup>7</sup>, a qual busca classificar os fatores limitantes para produção agrícola (profundidade, drenagem, fertilidade e textura no componente solo, enquanto utiliza a declividade e altitude para o componente relevo). No componente clima, o modelo de aptidão é baseado no Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA), originalmente proposto pela Organização para Alimentação e Agricultura (FAO)<sup>8</sup>, que por sua vez se baseia na evapotranspiração real e máxima de uma cultura de referência.

O resultado do processamento é um modelo de aptidão agrícola em formato matricial (raster) com resolução espacial de 30x30 metros abrangendo todo o território brasileiro, que se traduz em um índice variando de 0 (baixa aptidão) a 1 (alta aptidão). A seguir são descritas as bases de dados utilizadas e a metodologia empregada em cada uma das dimensões (solos, relevo e clima), bem como o procedimento de integração das informações.

---

<sup>4</sup> Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-28032013-110939/en.php>

<sup>5</sup> Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01300>

<sup>6</sup> Freitas FLM, Sparovek *et al.* Potential increase of legal deforestation in Brazilian Amazon after Forest Act revision, *Nature Sustainability* v 1 p. 665–670 (2018)

<sup>7</sup> PEREIRA, L. C., e LOMBARDI NETO, F. (2004). *Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica*. Embrapa Meio Ambiente. Documentos n. 43. 36 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/14508>

<sup>8</sup> DOORENBOS, J., & PRUITT, W. O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper n. 24. Food and Agriculture Organization, Rome. 154 p. Disponível em: <http://www.fao.org/publications/card/en/c/6bae3071-5d7b-5206-af5c-c9bfa1d9d1fe/>

## **Dimensão solo**

A aptidão geral de solos foi definida considerando fatores limitantes para culturas agrícolas, os quais foram relacionados direta ou indiretamente com as informações disponibilizadas pelo *SoilGrids*. Esse banco de dados apresenta cobertura mundial, incluindo o Brasil, com resolução espacial de 250 m, conforme metodologia e bases de informações disponibilizadas pelo *International Soil Reference and Information Center (ISRIC)*<sup>9</sup> e descrito em Hengl *et al.* (2013)<sup>10</sup>. Os solos são interpretados no modelo como um meio de crescimento das plantas, ou seja, as múltiplas informações são sintetizadas e hierarquizadas segundo a capacidade de prover condições de desenvolvimento vegetal em um processo de avaliação multifatorial, onde se atribui uma nota de qualidade variando de 0 (máxima restrição) a 1 (mínima restrição), considerando intervalos quantitativos de determinado atributo avaliado, para posterior integração em um índice geral que representa a aptidão dos solos para culturas agrícolas.

## **Informações de solos consideradas na avaliação**

As informações de solo abrangem uma série de componentes que condicionam o potencial produtivo, as propriedades físico-hídricas do solo, bem como a aptidão aos diferentes sistemas de manejo e conservação do solo.

O objetivo na avaliação de aptidão dos solos é traduzir as variáveis quantitativas em índices, de modo que possam ser combinados algebricamente. Para isso, é importante que o valor mínimo (0) e máximo (1), atribuídos para cada intervalo da variável quantitativa, representem de maneira consistente e equilibrada as restrições para a agricultura. Esse procedimento é repetido inúmeras vezes, considerando: (i) julgamento agrônomo de intervalos de cada atributo do solo fomentado por sistemas de avaliação da aptidão da terra já consolidados, (ii) análise da dispersão dos valores (histogramas) de cada atributo considerado. Cada resultado também é comparado a mapas de solos tradicionais para avaliar a correspondência espacial com a avaliação de aptidão estimada a partir destes mesmos mapas.

### **a) Profundidade**

A profundidade do solo interfere na capacidade de desenvolvimento do sistema radicular das plantas, garantindo a sua sustentação e absorção de água e nutrientes. As restrições implicam na dificuldade das plantas se instalarem e desenvolverem. A avaliação desse fator limitante foi conduzida a partir da variável do projeto *SoilGrids* denominada “Probabilidade de ocorrência de horizonte R dentro de 200 cm de profundidade (%)” (pR), a qual indica a máxima probabilidade (valor 1) do horizonte R

---

<sup>9</sup> <https://www.isric.org/explore/soilgrids>

<sup>10</sup> Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748.g001>

estar presente até uma profundidade de 200 cm e valor 0 para a probabilidade do horizonte R estar mais profundo que 200 cm<sup>11</sup>. Assim, a pR foi categorizada a partir da análise de histograma e comparação visual com o mapa pedológico do Brasil: pR ≤ 10%: aptidão muito alta; 10% < pR ≤ 20%: alta aptidão; 20% < pR ≤ 30%: média aptidão; pR > 30%: baixa aptidão.

## b) *Drenagem*

A drenagem associada à profundidade, relação textural e declividade do terreno, distingue as condições de disponibilidade de oxigênio para o sistema radicular das plantas e risco de salinização. O encharcamento permanente, decorrente da deficiência de drenagem do solo em virtude do afloramento do lençol freático, e o encharcamento temporário da camada subsuperficial do solo, foram parâmetros considerados para a elaboração da chave de categorização a partir da classe taxonômica do solo, já que nenhuma informação de drenagem foi originalmente mapeada pelo projeto *SoilGrids*.

As classes taxonômicas de solos agrupam um elevado grau de informações pedológicas que podem ser utilizadas na interpretação e detecção de restrições ao cultivo agrícola. O sistema de classificação utilizado no projeto *SoilGrids* é o *World Reference Base* (WRB) da FAO<sup>12</sup>. A construção de uma *proxy* da drenagem para composição do índice de qualidade dos solos foi baseada na classe taxonômica predita até o nível de subclasse. O **Quadro 6**, no **Anexo 2**, correlaciona as classes de solos WRB ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS<sup>13</sup> e indica o critério utilizado para a interpretação da drenagem. Como exemplo da interpretação das classes taxonômicas, solos mal drenados devido a persistência do lençol freático, como Gleissolos e Organossolos, foram considerados com aptidão muito baixa. Solos mal ou pouco desenvolvidos, com restrição de profundidade, como os Neossolos e Cambissolos, foram classificados como baixa aptidão. Solos com algum impedimento físico em subsuperfície, causado tanto pela presença de minerais ou maior acúmulo de argila, como Argissolos, Luvisolos e Vertissolos, foram considerados como drenagem média. Solos profundos e bem estruturados, como Latossolos e Nitossolos, foram categorizados nas classes alta ou muito alta.

## c) *Textura*

---

<sup>11</sup> Shangguan, W., Hengl, T., de Jesus, J. M., Yuan, H., & Dai, Y. (2017). Mapping the global depth to bedrock for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(1), 65-88. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016MS000686>

<sup>12</sup> IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. Disponível em: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-classification/world-reference-base/en/>.

<sup>13</sup> Dos Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Dos Anjos, L. H. C., De Oliveira, V. A., Lumbrreras, J. F., Coelho, M. R., ... & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>



A textura é indicativa da granulometria dos solos, que tem geralmente variação colinear à fertilidade, por influenciar diretamente na estabilização da matéria orgânica e da capacidade de troca de cátions dos solos. Assim, um solo de textura arenosa normalmente apresenta um potencial de retenção de nutrientes catiônicos mais baixo que um solo de textura argilosa. Além disso, a textura proporciona um melhor desenvolvimento da estrutura do solo, a qual conseqüentemente afeta a drenagem e o desenvolvimento radicular. Assim, a textura foi utilizada para auxiliar na representação do efeito simultâneo e em diferentes níveis de fatores relacionados à fertilidade (retenção de cargas), estrutura e drenagem do solo. De modo geral, para o índice de qualidade do solo do modelo de aptidão, solos argilosos foram considerados de melhor qualidade que solos arenosos, e os de textura média foram considerados intermediários. Solos com valores extremamente altos de argila também foram considerados de qualidade intermediária pois podem ser suscetíveis à compactação quando mal manejados e ter a mecanização dificultada devido à elevada plasticidade e pegajosidade. Para representar a textura do solo, somente o teor de argila mapeado pelo projeto *SoilGrids* foi utilizado, uma vez que os teores de areia são inversamente proporcionais à argila. O teor de argila (A) da camada 0-60 cm foi classificado a partir da adaptação do agrupamento textural do sistema brasileiro de classificação de solos, que também é utilizado na metodologia de avaliação da aptidão agrícola de terras: 35%  $\leq$  A < 60%: alta aptidão; A  $\geq$  60%: média aptidão; 25%  $\leq$  A < 35%: média aptidão; 15%  $\leq$  A < 25%: baixa aptidão; A < 15%: aptidão muito baixa.

#### d) *Fertilidade*

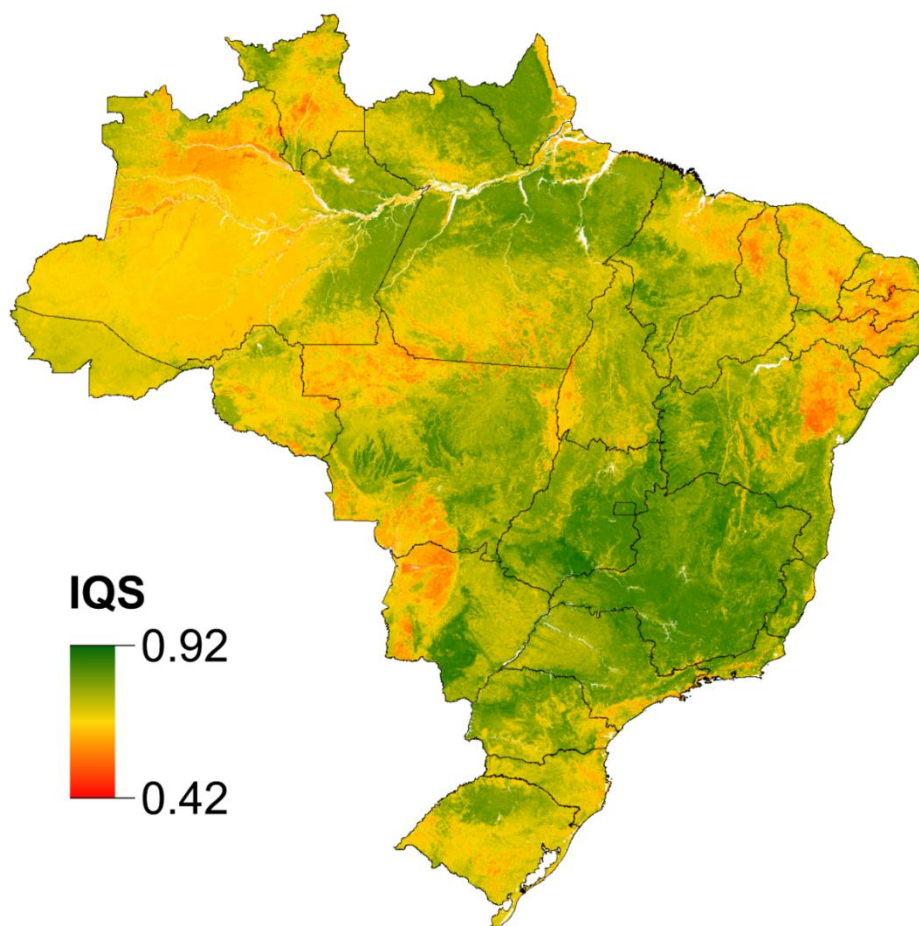
A fertilidade do solo refere-se à capacidade natural de fornecer nutrientes às plantas e manter este fornecimento ao longo do tempo, definindo assim o potencial de produção sem considerar a utilização de adubos e corretivos. Entretanto, como as áreas agrícolas são frequentemente corrigidas a partir da calagem e aplicação de nutrientes, optou-se por ponderar a componente fertilidade por meio de duas propriedades químicas: capacidade de troca de cátions (CTC,  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), a qual representa a capacidade do solo em reter nutrientes catiônicos, e o nível de acidez subsuperficial, definido por pH menor que 5 e baixa saturação por bases. Ambas as informações foram produzidas originalmente pelo projeto *SoilGrids*. Assim, a CTC considerando o teor médio da camada 0-60 cm foi classificada a partir da adaptação dos teores utilizados no método de avaliação da aptidão agrícola de terras: CTC  $\geq$  20  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ : aptidão muito alta; 10  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1} \leq$  CTC < 20  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ : alta aptidão; 5  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1} \leq$  CTC < 10  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ : média aptidão; 2  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1} \leq$  CTC < 5  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ : baixa aptidão; CTC < 2  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ : aptidão muito baixa. Por outro lado, o nível de acidez subsuperficial, que considera a camada 15-60 cm, é fornecido originalmente em 5 classes, que foram interpretadas e adaptadas para este trabalho: 0: aptidão muito alta; 1: aptidão alta; 2: média aptidão; 3: baixa aptidão; 4: aptidão muito baixa. Portanto, a componente fertilidade foi definida pela média aritmética da aptidão da CTC com a aptidão referente à acidez subsuperficial.

## Índice de qualidade do solo (IQS) para culturas agrícolas

O Índice de qualidade do solo para culturas agrícolas foi produzido através da integração das variáveis de aptidão de profundidade (P), textura (T), drenagem (D) e fertilidade (F1+F2). A variável fertilidade é composta duas propriedades: CTC (F1) e acidez subsuperficial (F2). Inicialmente, essas variáveis tiveram suas classes de aptidão convertidas para valores numéricos, onde os valores de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 e 1.0 foram, respectivamente, atribuídos às classes de aptidão muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. O procedimento de integração dessas variáveis para produção do índice de qualidade dos solos (IQS, **Figura 4**) foi realizado a partir da média aritmética entre essas variáveis, como descrito na Equação 1.

$$IQS = \frac{P+T+D+(F1+F2)/2}{4} \quad (1)$$

**Figura 4.** Índice de qualidade do solo (IQS) para culturas agrícolas



### **Dimensão relevo**

O índice de qualidade do relevo (IQR) para culturas agrícolas reflete a viabilidade para mecanização e restrição de uso por ser área de preservação permanente, considerando a declividade do terreno e limites de altitude para o desenvolvimento da maioria das espécies agrícolas. Os dados utilizados no procedimento provêm do modelo de elevação digital do terreno gerado pelo programa *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) em resolução espacial de 30x30 m. A declividade foi calculada a partir de uma janela móvel de 9 vizinhos (3x3 *pixels*), sendo classificada a partir da adaptação dos critérios presentes no método de avaliação da aptidão agrícola de terras. Desta forma, independentemente da aptidão edáfica e climática, áreas com declividade acima de 20% apresentam elevada dificuldade ou impossibilidade do uso de máquinas para operações agrícolas. Em relação à altitude, locais situados acima de 1800 m de altitude são classificados como Áreas de Preservação Permanente (de acordo com a Lei nº 12.651/2012) e, portanto, são inaptos para o cultivo agrícola. O **Quadro 3** apresenta os critérios de aptidão do relevo para culturas agrícolas.

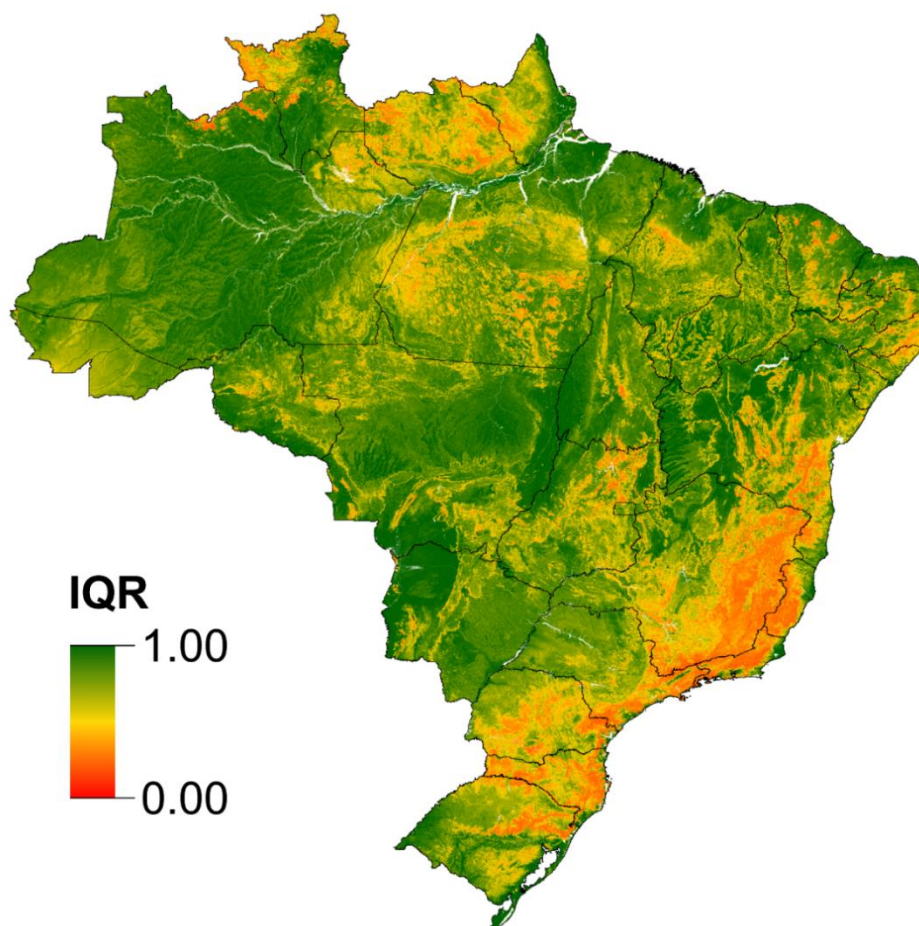
### Quadro 3. Critérios para avaliação da aptidão para culturas agrícolas em função da altitude e declividade

Classes de aptidão de declividade	Classes de aptidão de altitude
Muito alta (declividade: 0-3%)	Muito alta (altitude: 0-1800 m)
Alta (declividade: 3-8%)	Muito baixa (altitude: >1800 m)
Média (declividade: 8-13%)	
Baixa (declividade: 13-20%)	
Muito baixa (declividade: >20%)	

### Índice de qualidade do relevo para culturas agrícolas (IQR)

Para compor o índice de qualidade do relevo (IQR) para culturas, as classes de aptidão foram convertidas para valores numéricos atribuindo os valores 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 e 1.0 para as classes de aptidão muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, respectivamente. Em seguida, o IQR foi calculado considerando se a restrição por altitude (acima de 1800 m) era o principal fator limitante para determinado local, tornando a aptidão muito baixa, enquanto os locais sem restrição de altitude foram definidos unicamente pela sua aptidão de declividade, já que a altitude deixou de ser um fator limitante. A **Figura 5** apresenta o mapa resultante do processamento do modelo de elevação digital do terreno (SRTM) para gerar índice de qualidade do relevo (IQR) para culturas agrícolas.

**Figura 5.** Índice de qualidade do relevo (IQR) para culturas agrícolas



### ***Dimensão clima***

As condições climáticas definem em grande parte o rendimento das culturas e podem também indicar a necessidade de irrigação para reduzir os riscos de quebra de produção. Os componentes do clima (precipitação e temperatura) são convertidos em um índice variando de 0 a 1, intitulado Índice de Qualidade do Clima (IQC), que avalia a influência da deficiência hídrica no rendimento das culturas. Neste caso, o IQC é obtido a partir da interpretação do Índice de Satisfação à Necessidade de Água (ISNA), que por sua vez é resultado da evapotranspiração real (sob efeito de deficiência hídrica) comparada com a evapotranspiração potencial (sem influência da deficiência hídrica). O ISNA permite avaliar a influência da falta de água na produtividade das culturas agrícolas. Um valor baixo deste índice indica grande impacto no rendimento, porém, não linearmente. O cálculo deste índice é feito com base no banco de dados georreferenciado contendo mensurações diárias de temperatura, precipitação, radiação solar incidente, velocidade de ventos e umidade relativa. A partir dos dados é calculado o balanço hídrico

climatológico (BHC) com o método de Thornthwaite & Mather (1955)<sup>14</sup> e o Índice de Satisfação à Necessidade de Água (ISNA). Por fim, o IQC é gerado pela interpretação da curva do ISNA.

O procedimento de cálculo do BHC e do índice de temperatura e precipitação (ITW) foi realizado para cada *pixel* com resolução de 0.25° x 0.25°, originalmente presente na base de dados Xavier (2016), abrangendo o período de 01/01/1980 a 31/12/2015. Posteriormente, os resultados foram reamostrados para 250 e 30 m de resolução para se tornarem compatíveis com as outras dimensões (solo e relevo).

### **Índice de Satisfação à Necessidade de Água (ISNA)**

Para o cálculo do Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA), é preciso realizar o cálculo da (i) evapotranspiração potencial (ETP) pelo método combinado FAO Penman-Monteith, descrito em Allen et al. (1998)<sup>15</sup>; e da (ii) evapotranspiração real (ETR) pelo método do BHC de Thornthwaite & Mather (1955). A ETP considera a variação climática diária de temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar em sua equação. Além disso, o coeficiente de cultura é utilizado para ajustar a evapotranspiração de referência para uma determinada cultura e suas fases fenológicas. Já o método do BHC é utilizado para calcular a ETR pela simulação sequencial considerando tanto os aspectos climáticos quanto do solo.

A partir da relação entre ETP e ETR, calcula-se a evapotranspiração relativa (ETr) em escala diária. Para a configuração do conceito de ISNA, concatena-se a evapotranspiração relativa em períodos representativos, neste caso, as fases fenológicas da cultura em questão, de modo a condensar a resolução temporal em quatro indicadores para cada fase fenológica: estabelecimento, desenvolvimento vegetativo, florescimento ou inversão de drenos, e maturação fisiológica.

A definição das fases fenológicas, duração do ciclo e coeficientes de cultura (Kc) foi baseada na cultura do milho, que foi nomeado como ciclo de cultura referência. Uma vez obtido os valores de ISNA para cada fase fenológica, a média geométrica dos três primeiros indicadores é calculada para representar o ISNA do ciclo total, considerando assim, as variações extremas apresentadas por cada uma das fases. Vale pontuar que são tomados apenas os três primeiros índices porque estes são representantes dos períodos fenológicos altamente susceptíveis à déficit hídrico, diferentemente da última fase, onde a produtividade já não sofre perdas significativas pela restrição hídrica.

Para a aplicação do método de estimativa do ISNA, é necessário realizar o BHC sequencial de Thornthwaite & Mather (1955). Nesta etapa, entretanto, é necessário

---

<sup>14</sup> THORNTWHAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. Publications in Climatology, New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955. 104p.

<sup>15</sup> ALLEN, R. G et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

definir uma data de semeadura para dar início a simulação. Esta data é de suma importância e deve ser calculada para cada local do país, resultando no ISNA crítico. Detalhes sobre o cálculo das variáveis que compõem o ISNA podem ser vistos no **Anexo 1**.

## ISNA crítico e data de semeadura

Para definição da data de semeadura utilizada no modelo, a solução metodológica adotada consistiu em simular plantios para todos os decêndios do ano (total de 36), onde um decêndio se refere a um período de 10 dias corridos.

O ISNAC é um indicador de quantidade de água disponível no período crítico das culturas, ou seja, o período em que a cultura se encontra no seu estágio de desenvolvimento mais vulnerável ao déficit hídrico, o florescimento. Esse período crítico varia de acordo com a fenologia, tamanho do ciclo e estádios de desenvolvimento de cada cultivo. Para os cereais (arroz, milho, feijão e soja) o período crítico adotado gira em torno do ponto médio da fase de enchimento de grãos, nomeado pela FAO<sup>16</sup> como *mid-season stage*. A **Tabela 2** apresenta os limites do período crítico para a cultura genérica em comparação com o de outras culturas anuais, baseando-se nos ciclos descritos no boletim 56 FAO.

**Tabela 2.** Limites do período crítico para a culturas anuais e cultura genérica, em dias após a semeadura (DAS)

Cultura	Limite inferior (DAS)	Limite superior (DAS)	Ciclo (Dias)
Cultura genérica	87	103	150
Milho	63	79	120
Feijão	49	65	95
Arroz	84	100	165
Algodão	85	101	155
Soja	59	75	115

Ao fim da simulação da cultura genérica, obtém-se, para cada ponto do território, uma lista com os valores de ISNAC relativos a cada um dos 36 decêndios do ano. Para selecionar a data de plantio, toma-se o maior valor dentre os 36 períodos, que por sua vez representa o decêndio de plantio em que o período crítico da cultura coincide com o momento de maior Índice de Satisfação da Necessidade de Água Crítico (ISNAC), ou seja, a cultura está com maior disponibilidade de água. Com isso, o objetivo é representar

<sup>16</sup> ALLEN, R. G et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e0b.htm>

a situação real de plantio no campo, em que o produtor geralmente aloca a semeadura, e, portanto, o período crítico da cultura de modo que não haja deficiência hídrica nesta fase.

Uma vez tomada a data de plantio, a metodologia já descrita para cálculo do ISNA é aplicada, tomando como data de semeadura o decêndio obtido.

### Tamanho do ciclo da cultura de referência

O tamanho do ciclo definido para a simulação deve ser representativo às culturas anuais como soja, feijão, algodão, arroz etc., abrangendo temporalmente o período das águas nas regiões produtoras, que é quando se realiza de fato os cultivos anuais de sequeiro, com uma duração média de 5 meses nos grandes polos produtores de grãos (MT, MS, GO, RS e PR). Dessa forma, adotou-se o ciclo e a duração das fases fenológicas referentes à cultura do milho descrito no boletim 56 da FAO. Neste boletim, a duração do ciclo do milho sugerida vai de 125 dias até 150 dias e, para o Brasil, ambos os valores são plausíveis, sendo 150 dias o ciclo de milho tardio ou muito tardio e 125 dias o ciclo de milho precoce. Diante disso, adotou-se como ciclo de referência o do milho tardio de 150 dias, que apesar de não ser o mais praticado, pode ser mais representativo quando busca-se espelhar diversas culturas anuais. Os estádios fenológicos subdividem-se em quatro: *Init* (Estabelecimento), *Dev.* (Desenvolvimento vegetativo), *Mid* (Florescimento ou inversão de drenos) e *Late* (Maturação fisiológica). A **Tabela 3** descreve a duração dessas fases e seus respectivos coeficientes de cultura.

**Tabela 3.** Duração de ciclo, duração das fases fenológicas e coeficientes de cultura de referência

Fase	Genérica (Dias após a semeadura)	Coefficiente de cultura (Kc)
Estabelecimento	0 – 30	0.70
Desenvolvimento vegetativo	30 – 70	0.70 - 1.15*
Florescimento ou inversão de drenos	70 – 120	1.15
Maturação fisiológica	120 - 150	1.15 – 0.60*§
<b>Ciclo total</b>	<b>150</b>	-

\* A transição entre os dois valores se dá por meio de uma reta de coeficiente angular  $f1 = \frac{1.15-0.7}{70-30} = 0.01125$  para a fase de desenvolvimento vegetativo e  $f2 = \frac{1.15-0.60}{150-120} = 0.027$  para a fase de Maturação fisiológica.

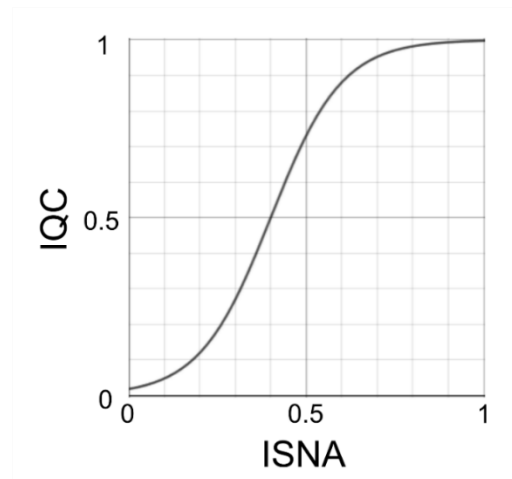
§ O Kc final para a maturação fisiológica (0.60) foi adotado pela interpretação da nota técnica do boletim, de modo que: admite-se o cenário mais representativo como sendo aquele em que a maturação fisiológica no campo não é continuada até a umidade de 18%, e sim, feita até um ponto de umidade acima desse patamar (varia de acordo com condições climáticas e chuva).



## Índice de Qualidade do Clima (IQC)

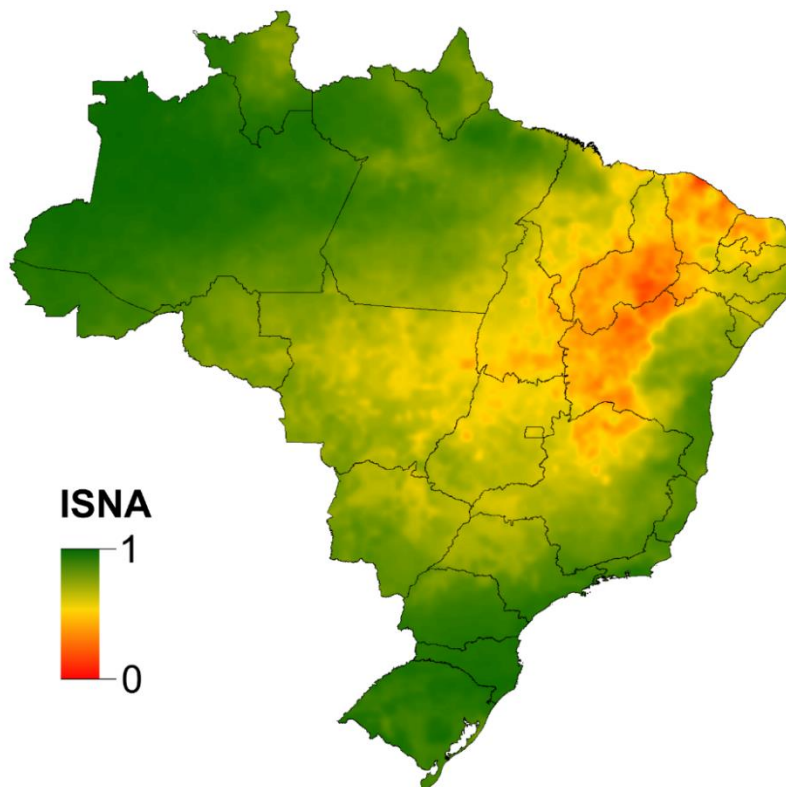
O IQC varia de 0 a 1 e é uma interpretação do ISNA para a cultura de referência. Para tal interpretação, leva-se em consideração a resiliência das culturas à diminuição de armazenamento de água no solo, ou seja, a capacidade de extração de água pelo sistema radicular, mesmo com o solo aquém da capacidade de campo, em termos de umidade. Para isso, calibrou-se uma curva logística, apontada na **Figura 6**, que toma como valores de referência o intervalo de 0-0,6 representante de alto estresse hídrico com perdas de produtividade (necessidade de irrigação), intervalo de 0,6-0,8 como médio estresse hídrico (irrigação eventual), e o intervalo de 0,8-1,0 como baixo estresse hídrico, onde não é necessária a irrigação. A partir do valor do ISNA de 0.6, onde o IQC está próximo de 0,9, os valores de IQC começam a decair quase que exponencialmente definido pela função logística.

**Figura 6.** Curva logística utilizada para a interpretação e reclassificação do ISNA

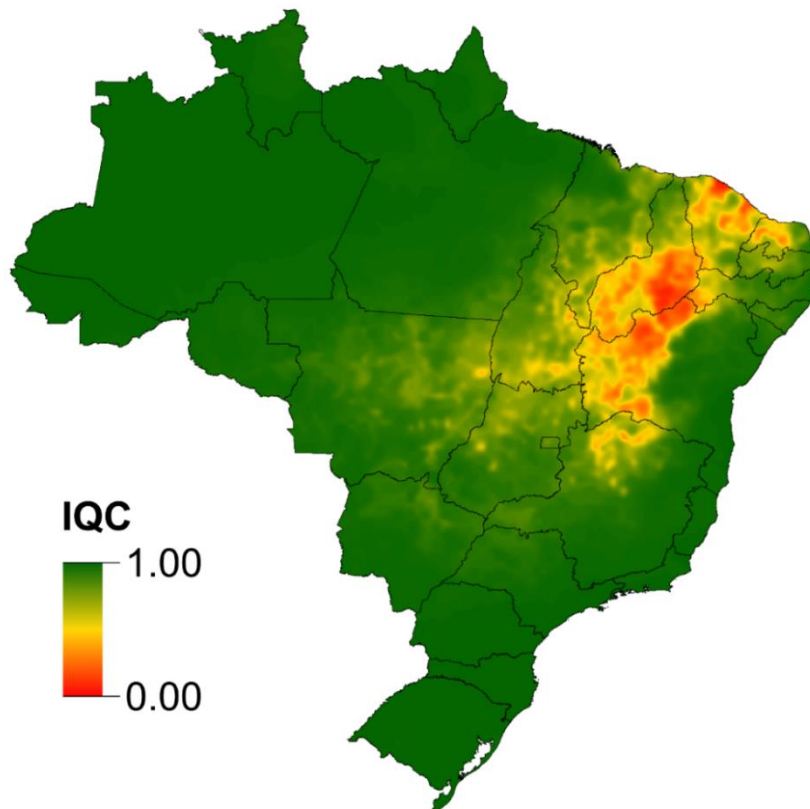


A **Figura 7** apresenta o mapa final com os valores de ISNA obtidos para cada ponto de simulação no Brasil. Com a aplicação da curva logística sobre a informação do ISNA, obtém-se o Índice de Qualidade do Clima para culturas agrícolas ilustrado na **Figura 8**.

**Figura 7.** Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA) para culturas agrícolas



**Figura 8.** Índices de qualidade do clima (IQC) para culturas agrícolas



### Índice de aptidão do meio físico (IAMF): integração de clima, solos, relevo

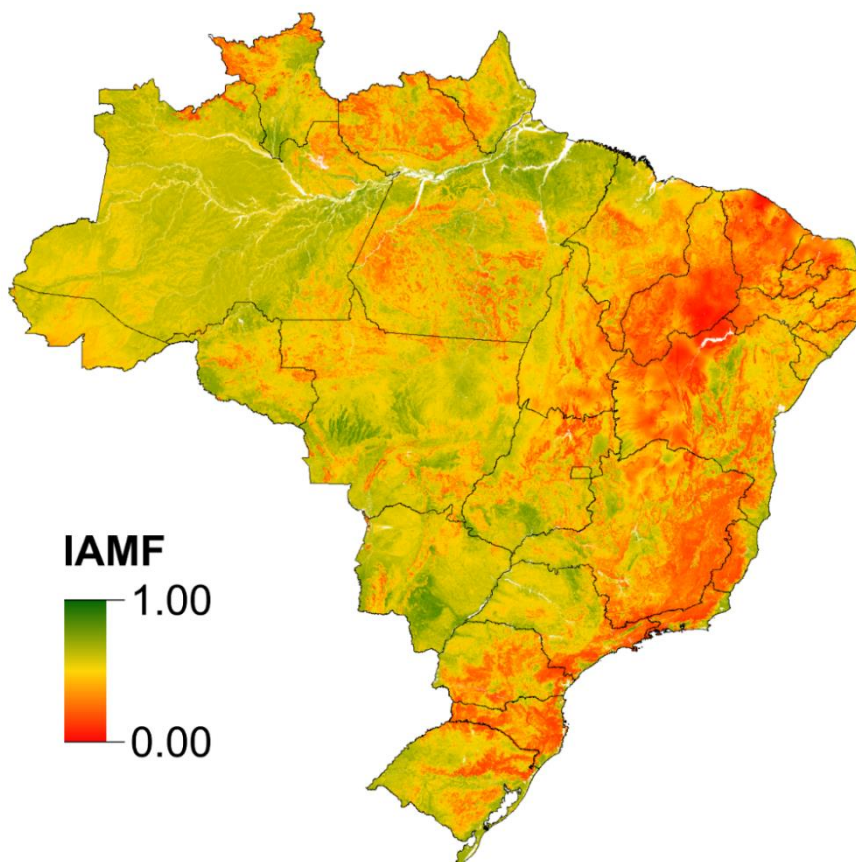
Na integração final dos componentes solo, relevo e clima em um único indicador de aptidão do meio físico, assumiu-se o mesmo peso para as dimensões em uma operação multiplicativa. Nesse caso, cada dimensão é um fator que, quando igual a zero, tem o efeito em anular o resultado. Tal procedimento alinha-se a “Lei do Mínimo” – Lei de Liebig – que estabelece que o desenvolvimento de uma planta ficará limitado pelo fator deficitário, mesmo que todos os outros fatores estejam presentes. O resultado é um índice cujo valor máximo equivale à satisfação de condições ideais em que há máximo aproveitamento dos fatores de produção do meio físico e alcance de máxima produtividade. Dessa forma, o Índice de Aptidão do Meio Físico (IAMF, **Figura 9** e **Figura 10**) para culturas agrícolas é o produto da multiplicação do IQS, IQR e IQC, como exposto na Equação 2 abaixo:

$$IAMF = IQS * IQR * IQC \quad (2)$$

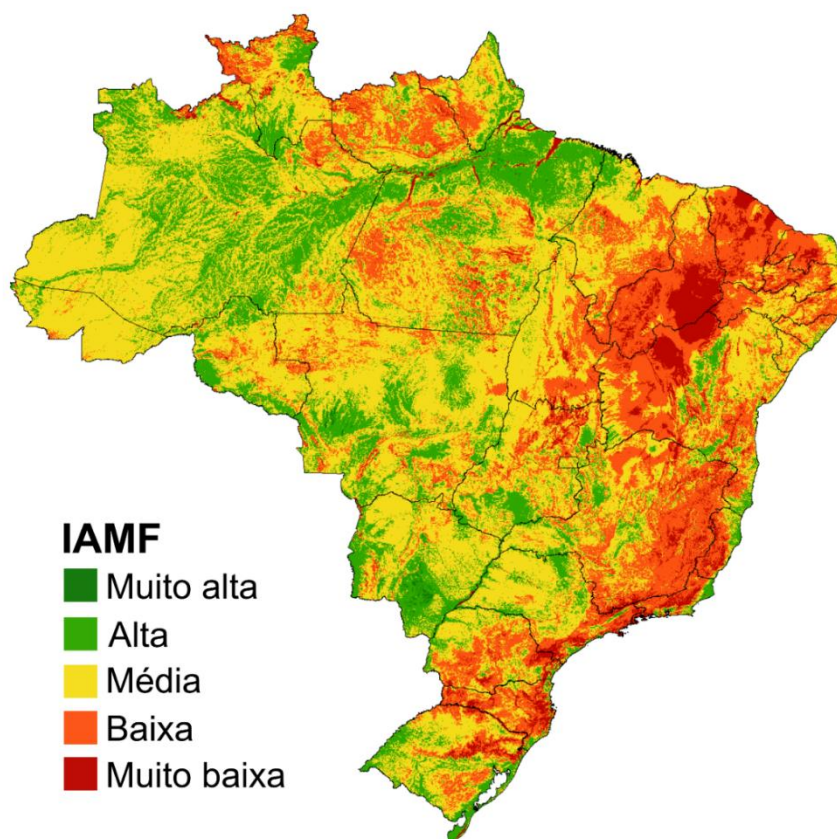
Os resultados obtidos são variáveis numéricas contínuas na forma de índices de intervalo 0 a 1, onde 0 significa uma condição inapta a cultivos agrícolas, e 1 representa uma condição de máximo potencial produtivo. Os índices de aptidão podem tanto ser interpretados qualitativamente, segmentando-se em intervalos regulares, como

utilizados em análises onde é necessária a expressão da qualidade do meio físico na forma quantitativa para integração com outros indicadores e malhas.

**Figura 9.** Índice de aptidão do meio físico para culturas agrícolas (IAMF)



**Figura 10.** Índice de aptidão do meio físico para culturas agrícolas (IAMF) representado em *quantis*: muito baixo  $\leq 0,2$ ;  $0,2 < \text{baixo} \leq 0,4$ ;  $0,4 < \text{médio} \leq 0,6$ ;  $0,6 < \text{alto} \leq 0,8$ ; muito alto  $> 0,8$



### 2.2.3 Infraestrutura para produção agrícola

Para a intensificação da irrigação em uma determinada propriedade rural, a presença ou proximidade dos componentes de infraestrutura não é suficiente para definir a viabilidade da prática. Em uma avaliação próxima da ideal, seria necessário avaliar a qualidade de cada componente da infraestrutura para favorecer uma tomada de decisão mais assertiva na escala de propriedade rural ou região agrícola. A modelagem de carga ou potência disponível na linha de distribuição de energia é um método que permitiria avaliar a qualidade e quantidade de potência disponível para o funcionamento dos equipamentos usados na irrigação.

Entretanto, esse tipo de análise demanda um detalhamento completo do sistema de distribuição de energia realizado por profissionais capacitados (engenheiro eletricista). Além disso, a modelagem de carga dificulta a sua aplicação em uma análise que contempla todo o território brasileiro. Para os demais componentes de infraestrutura, i.e., transporte e armazenamento, a qualidade poderia ser verificada com a disponibilidade de informações adicionais e metadados junto aos bancos de dados

nacionais, como por exemplo, tipologia, condição atual, precisão da localização espacial, período de referência etc. No entanto, esse é o principal fator limitante encontrado para os três componentes utilizados na avaliação da infraestrutura, impossibilitando uma análise mais minuciosa para a escala de propriedade ou região rural em todo o território brasileiro. Portanto, informações básicas como proximidade da infraestrutura de energia e transporte, além da capacidade de armazenamento estimada a nível municipal, foram utilizadas na análise territorial da agricultura irrigada neste estudo.

### **Fonte de dados**

O indicador de infraestrutura é construído a partir de três componentes individuais: energia, transporte e armazenamento. Cada componente visa representar um fator que pode restringir a produção agropecuária no contexto da expansão da agricultura irrigada.

A estrutura de transporte viária (rodovias e ferrovias) foi compilada a partir de banco de dados de entidades governamentais. Os arquivos vetoriais em formato multilinha foram recuperados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Com a união dos arquivos vetoriais, a distância entre linhas foi calculada para representar a estrutura viária do território nacional.

A estrutura de energia foi compilada a partir do banco de dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que monitora diferentes concessionárias (estaduais, regionais e microrregionais). As linhas de transmissão de média e alta tensão, que operam com uma tensão 1 kV e 69 kV, e acima de 69 kV, respectivamente, foram processadas para o ano mais recente disponibilizado pela concessionária, variando desde 2014, mas com maior concentração no ano de 2018. Além disso, as localizações das subestações foram resgatadas da base de dados geográficos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Com a união dos arquivos vetoriais, a distância entre linhas e pontos foi calculada para representar a proximidade da estrutura de transmissão de energia do território nacional.

Os dados de capacidade de armazenamento foram recuperados do Sistema de Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras (SICARM), mantido pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). O sistema é atualizado constantemente e disponibilizado *online*, mas as informações recuperadas representam o mês de maio de 2020. Os dados, conforme esclarecido pela CONAB, são registrados por pessoas físicas e jurídicas, mas validadas *in loco* pela instituição. A capacidade estática, em toneladas, de diferentes tipos de estruturas de armazenamento, foi agregada ao nível municipal e depois agregada na malha de regiões rurais do IBGE para gerar uma representação espacial que contemplasse o perfil regional.

### **Escala de análise**

A composição de um indicador de infraestrutura que integrasse os modais de transporte viário, a distribuição de energia e capacidade armazenamento, é limitada pela resolução espacial dos três componentes. A proximidade da estrutura viária de transporte e redes de energia pode ser representada de forma contínua na paisagem por imagens. Por outro lado, a informação da capacidade de armazenamento está limitada pelo limite geopolítico dos municípios e regiões rurais, onde o valor é distribuído uniformemente sobre a área interna dos polígonos. Assim, a forma mais adequada de padronizar a escala de análise é agregar os valores de distância na mesma malha geopolítica. Por outro lado, por conta da necessidade de estimar o indicador dentro da malha de microbacias, assumiu-se a ocorrência de valor constante da capacidade de armazenamento em todas as microbacias que estivessem dentro do polígono de abrangência das regiões rurais definida pelo IBGE. Para bacias em regiões de transição, foi calculada a média ponderada pela área relativa. As distâncias calculadas para a estrutura viária e de energia em arquivo *raster* foram agregadas pela estatística média utilizando os polígonos das microbacias.

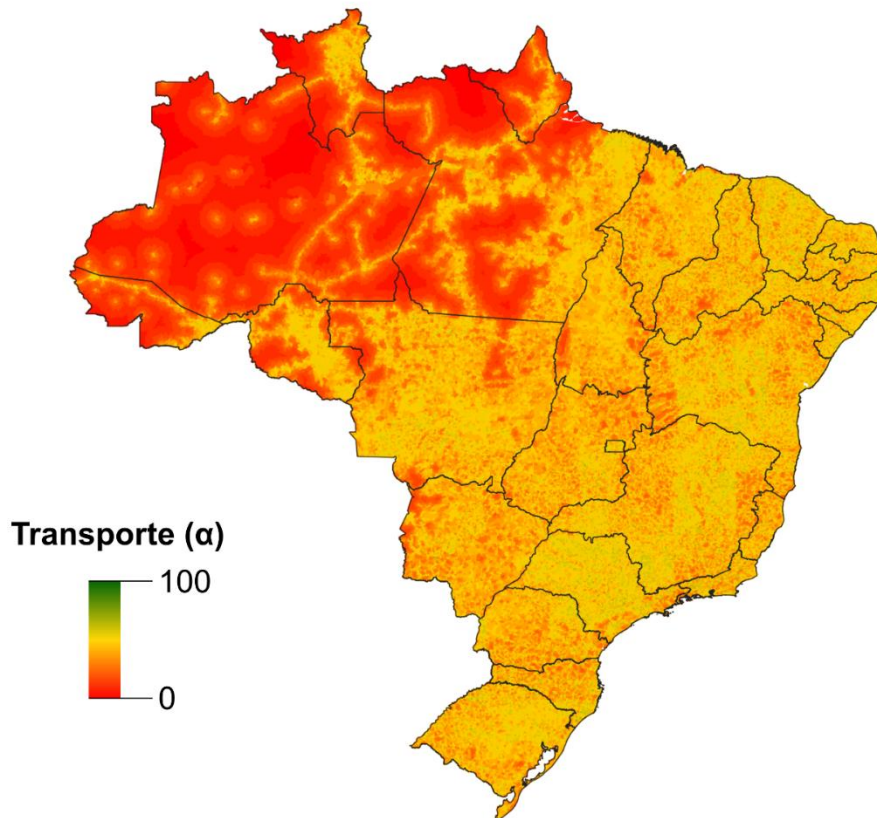
### **Construção do indicador**

Os valores originais de proximidade (m) e capacidade (toneladas) dos componentes de infraestrutura foram transformados matematicamente visando aumentar também o realce espacial dos dados. Assim, a transformação permitiu comparar visualmente os locais com grande contraste de valores a nível nacional. O cálculo do índice de caracterização da infraestrutura referente à proximidade dos modais de transporte ( $\alpha$ ) foi calculado conforme a Equação 3. As distâncias foram transformadas para a escala logarítmica na base 10 a fim de realçar a magnitude das diferenças espaciais entre as microbacias, devido a concentração de grandes distâncias na região amazônica. Além disso, o valor para a  $i$ -ésima microbacia foi normalizada para o intervalo de 0 a 1 utilizando os valores médios mínimo e máximo existentes no território nacional. O resultado foi subtraído de 1 e multiplicado por 100 para inverter a escala original e representar o indicador no intervalo 0 a 100. Assim, os maiores valores de  $\alpha$  indicam as microbacias que apresentam maior proximidade aos modais de transporte rodoviário e ferroviário (**Figura 11**).

$$\alpha_i = 100 \left( 1 - \left( \frac{\log_{10}(1 + T_i) - \log_{10}(1 + T_{min})}{\log_{10}(1 + T_{max}) - \log_{10}(1 + T_{min})} \right) \right) \quad (3)$$

em que  $T_i$  se refere à distância média (m) de modais de transporte ferroviário e rodoviário da  $i$ -ésima microbacia, e  $T_{min}$  e  $T_{max}$  a mínima e máxima distância média estimada em todo o território nacional, respectivamente.

Figura 11. Indicador da proximidade aos modais de transporte rodo e ferroviário



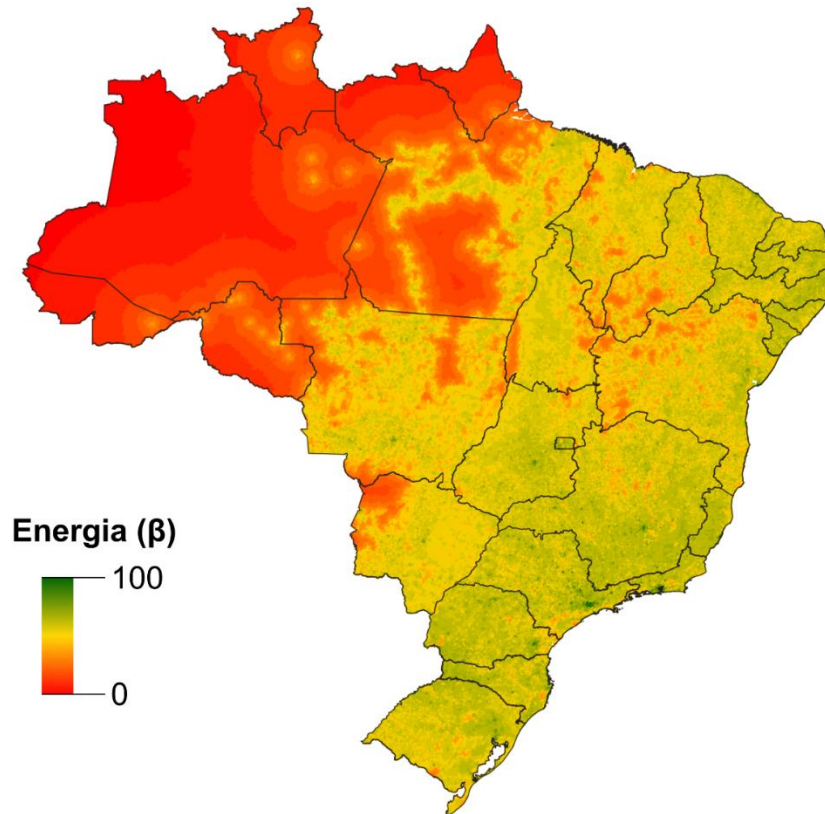
O índice de caracterização da infraestrutura referente à proximidade de linhas e pontos de energia ( $\beta$ ) foi calculado conforme a Equação 4. As distâncias foram transformadas para a escala logarítmica na base 10 a fim de realçar as diferenças espaciais entre as microbacias devido a concentração de grandes distâncias em algumas regiões do país. Além disso, o valor para a  $i$ -ésima microbacia foi normalizada para o intervalo de 0 a 1 utilizando os valores mínimo e máximo existentes no território nacional. O resultado foi subtraído de 1 e multiplicado por 100 a fim de inverter a escala original e representar o indicador no intervalo 0 a 100. Assim, os maiores valores de  $\beta$  indicam as microbacias que apresentam maior proximidade à rede de energia (**Figura 12**).

$$\beta_i = 100 \left( 1 - \left( \frac{\log_{10}(1 + E_i) - \log_{10}(1 + E_{min})}{\log_{10}(1 + E_{max}) - \log_{10}(1 + E_{min})} \right) \right) \quad (4)$$

em que  $E_i$  se refere à distância média (m) de redes de energia da  $i$ -ésima microbacia, e  $E_{min}$  e  $E_{max}$  a mínima e máxima distância média estimada no território nacional, respectivamente.



**Figura 12.** Indicador da proximidade às redes de distribuição de energia de alta e média tensão, e subestações

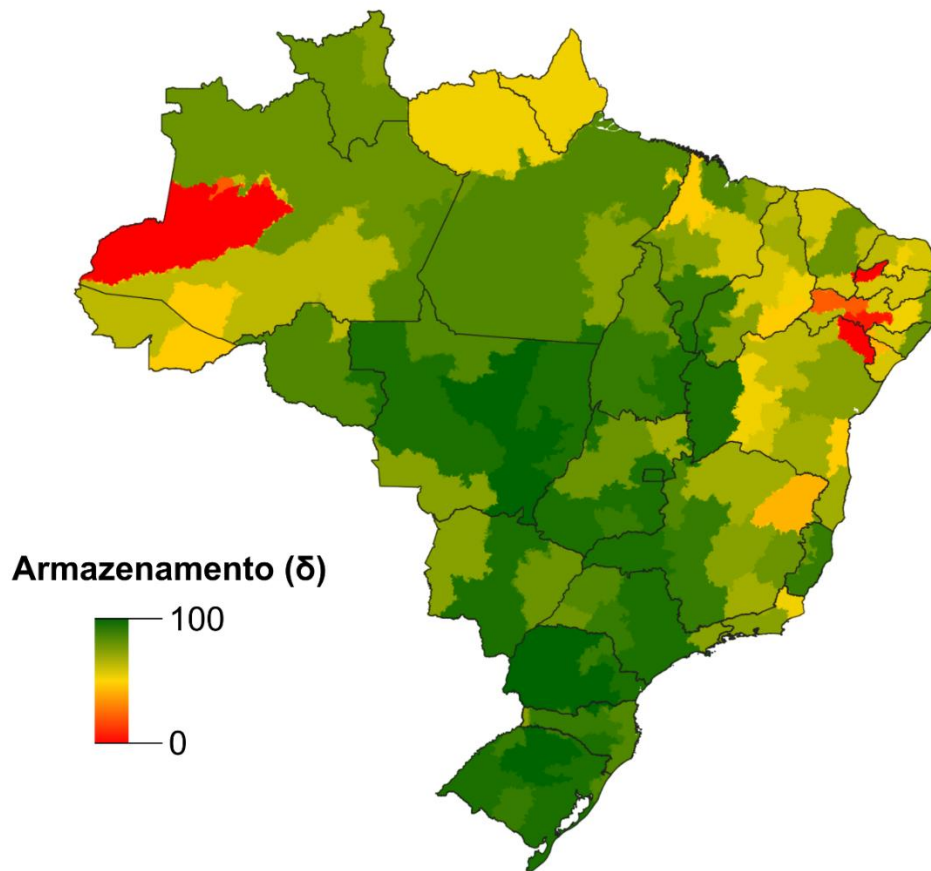


O índice de caracterização da infraestrutura referente à capacidade de armazenamento ( $\delta$ ) foi calculado conforme a Equação 5. A capacidade total de cada microbacia foi transformada para a escala logarítmica na base 10 devido a concentração de grandes valores em algumas regiões do país, realçando as diferenças espaciais entre os municípios brasileiros. Além disso, o valor para a  $i$ -ésima microbacia foi normalizada para o intervalo de 0 a 1 utilizando os valores mínimo e máximo existentes no território nacional. O resultado foi multiplicado por 100 a fim de representar o indicador no intervalo 0 a 100. Assim, os maiores valores de  $\delta$  indicam as microbacias que apresentam maior capacidade de armazenamento dentro da região rural definida pelo IBGE (**Figura 13**).

$$\delta_i = 100 \left( \frac{\log_{10}(1 + CA_i) - \log_{10}(1 + CA_{min})}{\log_{10}(1 + CA_{max}) - \log_{10}(1 + CA_{min})} \right) \quad (5)$$

em que  $CA_i$  se refere à capacidade de armazenamento (t) da  $i$ -ésima microbacia, e  $CA_{min}$  e  $CA_{max}$  a mínima e máxima capacidade estimada no território nacional, respectivamente.

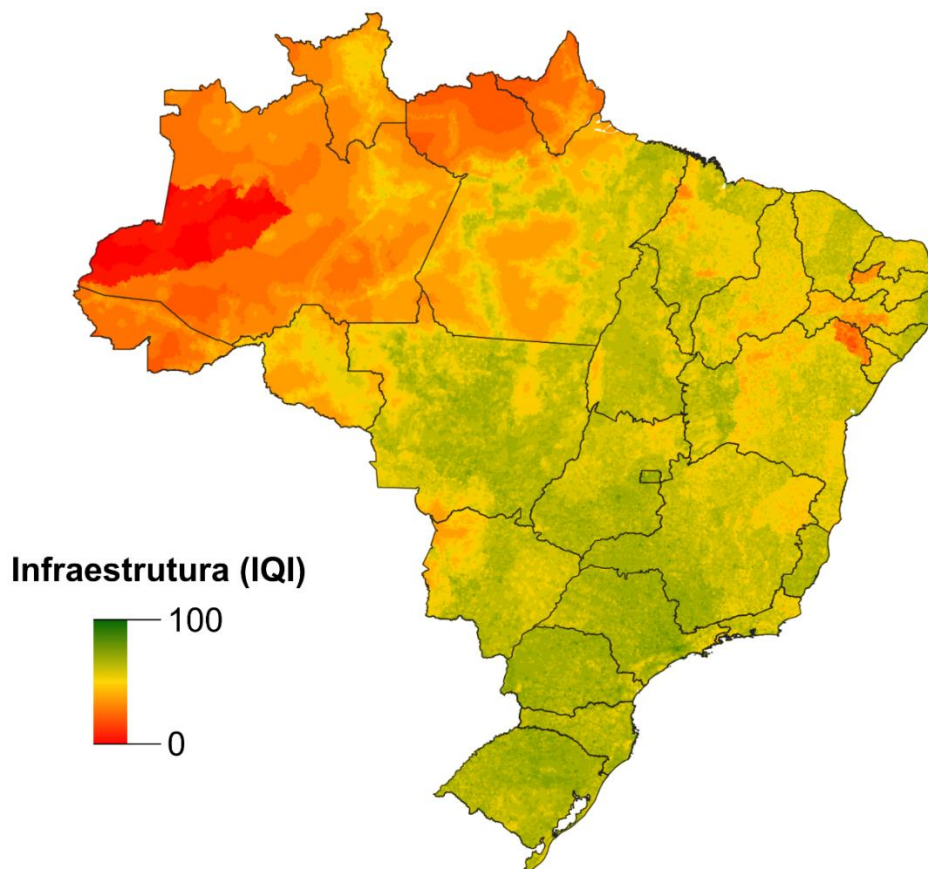
**Figura 13.** Indicador da capacidade de armazenamento dentro da região rural



Para integrar as informações e gerar o indicador de qualidade de infraestrutura (IQI), a média aritmética entre os componentes foi calculada (Equação 6, **Figura 14**). Também é oportuno categorizar os resultados em classes, uma vez que este resultado é utilizado juntamente com outras informações para a caracterização geral e identificação de áreas prioritárias à irrigação.

$$IQI = (\alpha + \beta + \delta)/3 \quad (6)$$

**Figura 14.** Infraestrutura calculada pela média dos componentes energia, transporte e armazenamento.



#### **2.2.4 Dinâmica da agricultura irrigada**

Para compor o conjunto de variáveis relacionados à modelagem de agricultura irrigada foram incluídas bases de acesso público, além de informações de acesso restrito disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA), as quais encontram-se detalhadas a seguir (**Quadro 4**). Esses dados são essenciais para a modelagem territorial de irrigação detalhados no próximo capítulo (3). Além dos dados listados no **Quadro 4**, também foram fornecidos pela ANA dados de localização dos pivôs centrais no Brasil.

#### Quadro 4. Variáveis relacionadas a recursos hídricos e dados climáticos

Variável	Descrição	Unidade
Uso da água na agricultura irrigada	Área irrigada e demanda hídrica no território brasileiro	ha, m <sup>3</sup> /s
Usos consuntivos da água no Brasil	Vazão total de retirada dos usos consuntivos (uso humano - urbano e rural, indústria de transformação, mineração, termelétricas, irrigação, abastecimento animal).	m <sup>3</sup> /s
Disponibilidade Hídrica Superficial	Disponibilidade hídrica superficial com permanência de 95% (Q95%).	m <sup>3</sup> /s
Disponibilidade Hídrica Subterrânea	Disponibilidade hídrica subterrânea	m <sup>3</sup> /s
Clima	Dados meteorológicos: precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento. Fonte: Xavier, A. C., King, C. W. and Scanlon, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). International Journal of Climatology, 2016.	mm/dia, graus Celsius, %, Mega joule/m <sup>2</sup> e m/s

#### Área irrigada no Brasil

Para qualificar as microbacias em relação à quantidade de agricultura irrigada já existente foi utilizada como referência a estimativa feita pela Agência Nacional de Águas (ANA) para compor o Atlas da Irrigação para ano de 2020. Os dados atuais de área irrigada estão espacialmente vinculados a escala de microbacias utilizadas neste estudo como unidade básica de processamento. Não foram consideradas as áreas identificadas pela ANA como fertirrigação em cana-de-açúcar; e foram consideradas as áreas de salvamento e as que realizam simultaneamente fertirrigação e salvamento.

A variável Área Irrigada (Alr) é incluída no modelo territorial de irrigação como variável quantitativa (em hectares) e também como variável categórica, de modo a permitir qualificar as diversas microbacias em Alta, Média e Baixa área irrigada.

Como mostra a **Tabela 4**, segundo os dados da ANA para 2020, o Brasil apresenta 5,6 milhões de hectares irrigados atualmente, dos quais as regiões sudeste e sul apresentam as maiores parcelas de áreas irrigadas, 32,1% e 25,8%, respectivamente. Essa parcela significativa nas duas regiões deve-se, principalmente, aos estados de Minas Gerais (53,0%) e São Paulo (30,3%) no sudeste, e ao estado do Rio Grande do Sul (79,8), na região sul.

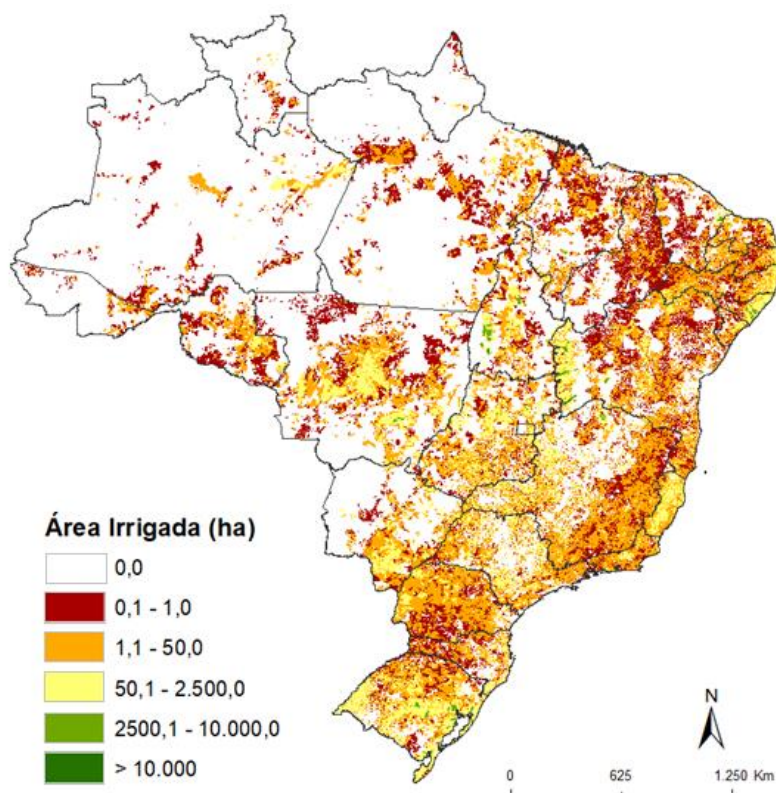
**Tabela 4. Área irrigada (ha) por unidade da federação**

Região	Unidade da Federação	Área Irrigada (ha)	%
Centro-Oeste	<b>Total</b>	<b>878.168</b>	<b>15,56</b>
	DF	22.059	2,51
	GO	511.676	58,27
	MT	253.297	28,84
	MS	91.136	10,38
Nordeste	<b>Total</b>	<b>1.268.869</b>	<b>22,48</b>
	AL	192.073	15,14
	BA	525.441	41,41
	CE	60.529	4,77
	MA	89.173	7,03
	PB	84.604	6,67
	PE	169.067	13,32
	PI	47.303	3,73
	RN	52.488	4,14
	SE	48.191	3,80
Norte	<b>Total</b>	<b>227.536.00</b>	<b>4,03</b>
	AC	1.366	0,60
	AP	2.103	0,92
	AM	5.100	2,24
	PA	24.001	10,55
	RO	15.956	7,01
	RR	3.831	1,68
	TO	175.179	76,99
Sudeste	<b>Total</b>	<b>1.813.297</b>	<b>32,12</b>
	ES	248.713	13,72
	MG	961.455	53,02
	RJ	52.665	2,90
	SP	550.464	30,36
Sul	<b>Total</b>	<b>1.457.578</b>	<b>25,82</b>
	PR	97.238	6,67
	RS	1.163.250	79,81
	SC	197.090	13,52
<b>BRASIL</b>	<b>TOTAL</b>	<b>5.645.448</b>	<b>100,00</b>

Fonte: ANA (2020)

A **Figura 15** apresenta a espacialização dos dados de área irrigada em hectares, os quais serão utilizados para compor as estimativas de **área adicional irrigável**, como será visto no próximo capítulo.

**Figura 15.** Distribuição espacial das áreas irrigadas atualmente no Brasil por microbacia



Fonte: Dados preliminares do Atlas da Irrigação, Agência Nacional de Águas (ANA, 2020).

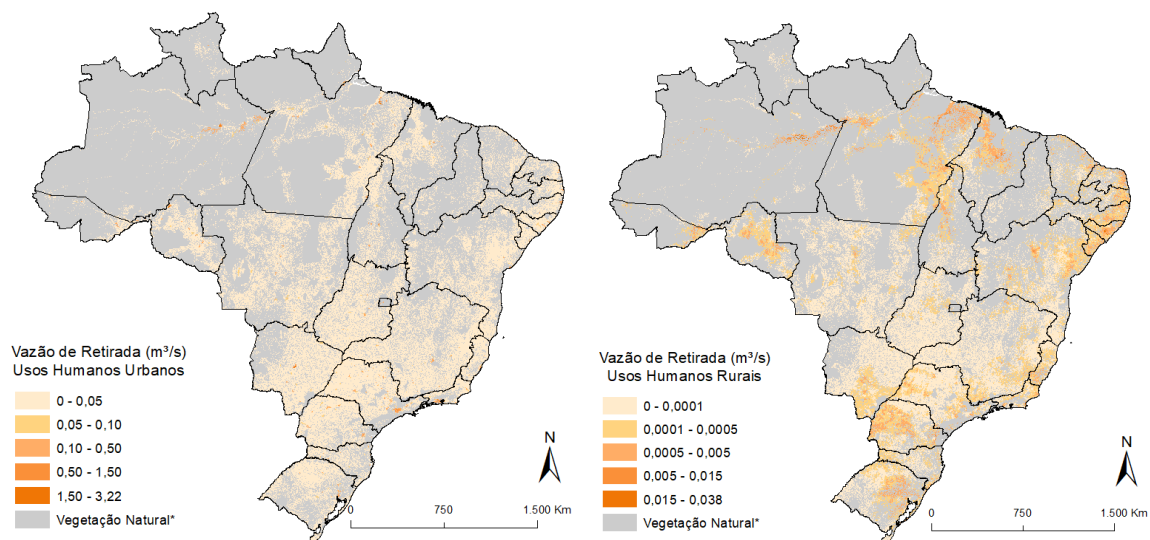
## Usos consuntivos

Os dados de usos consuntivos para cada microbacia são informações disponibilizadas pela ANA e estão divididos em: uso para humano urbano, consumo humano rural, indústria de transformação, mineração, geração termoelétrica, dessedentação animal e agricultura irrigada. Esses dados estão disponíveis para os anos de 2017, 2018, 2020 e existem projeções para os anos de 2025 e 2030.

As **Figura 16**, **Figura 17** e

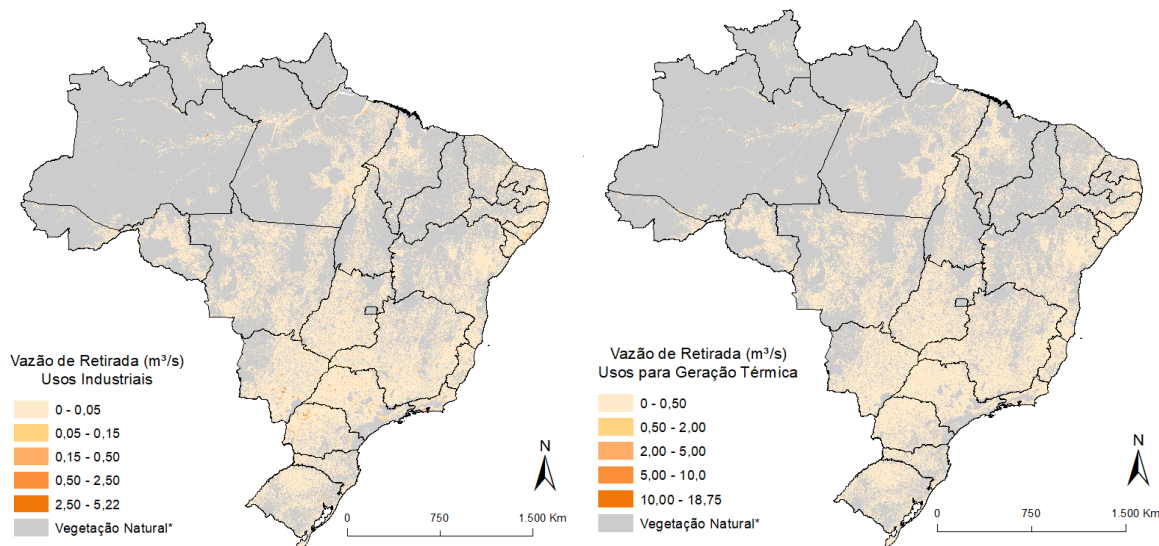
**Figura 18** apresentam a distribuição espacial dos valores de vazão de retirada para os diferentes tipos de usos considerados neste estudo.

**Figura 16.** Distribuição espacial dos valores de vazão de retirada para consumo humano no meio urbano e no meio rural



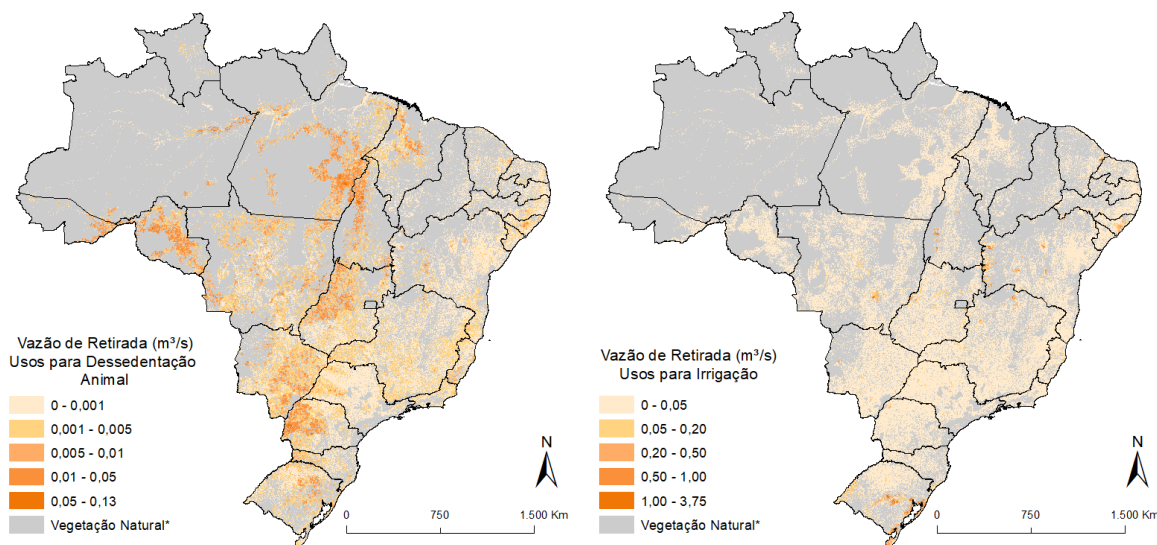
*\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental e Reserva extrativista).*

**Figura 17.** Distribuição espacial dos valores de vazão de retirada para indústria de transformação e para mineração, respectivamente



*\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental e Reserva extrativista).*

**Figura 18.** Distribuição espacial dos valores de vazão de retirada para dessedentação animal e para a irrigação agrícola, respectivamente



\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental e Reserva extrativista).

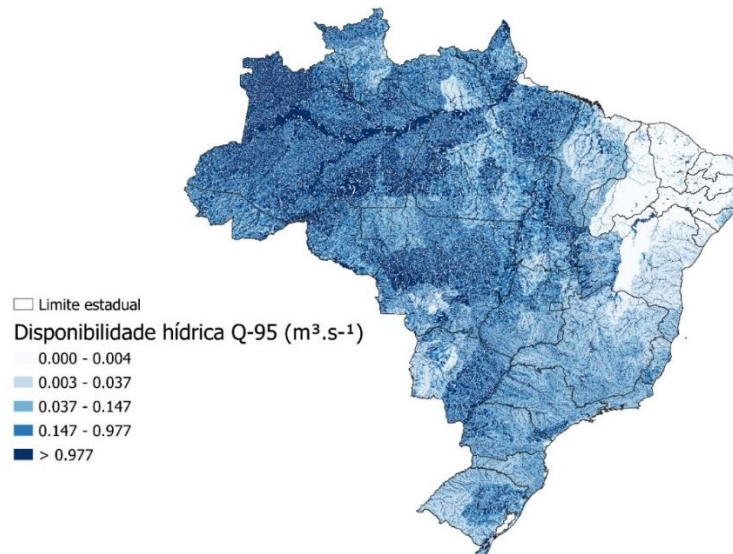
## Disponibilidade hídrica

A disponibilidade hídrica, assim como a demanda hídrica, está orientada sob a divisão do território em microbacias, e as informações disponibilizadas estão divididas em: (i) águas superficiais que têm origem nos cursos d'água; e (ii) águas subterrâneas que são provenientes de aquíferos, que podem ser acessados por meio de poços perfurados.

As informações pertinentes a águas superficiais e subterrâneas disponibilizadas pela ANA estão representadas nas **Figura 19** e **Figura 20**, respectivamente.

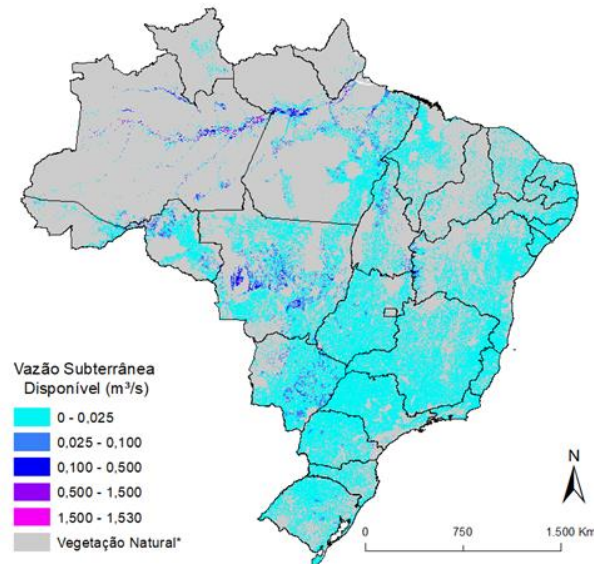


**Figura 19.** Distribuição da disponibilidade hídrica (Q-95)



Fonte: dados fornecidos pela Agência Nacional da Água (ANA)

**Figura 20.** Distribuição espacial da vazão subterrânea (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)



\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental e Reserva extrativista).

## Clima

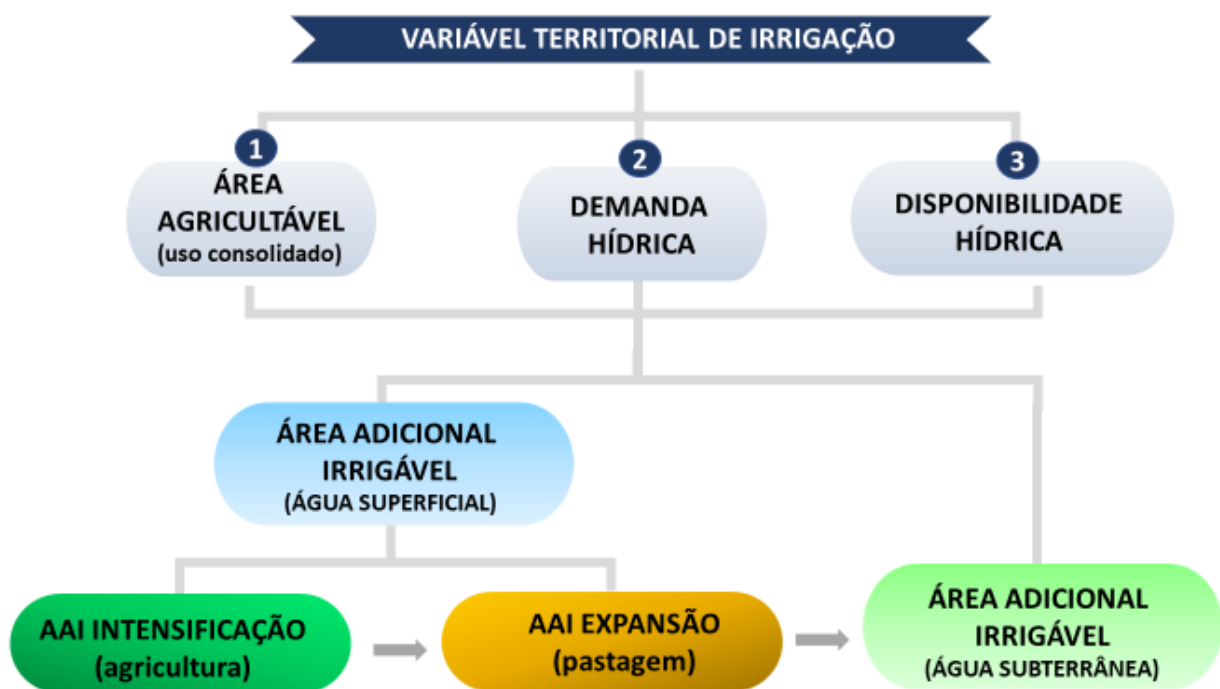
Os dados meteorológicos adotados neste estudo são provenientes de [Xavier et al. \(2016\)](#), os quais desenvolveram grids de alta resolução (0,25°x0,25°) de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento para o Brasil. Os dados foram obtidos a partir de 3.625 pluviômetros e 735 estações meteorológicas para o período de 1980–2013.

### 3. VARIÁVEL TERRITORIAL DE IRRIGAÇÃO

O presente capítulo discorre sobre os principais procedimentos utilizados para compor a variável territorial de irrigação, a qual busca mensurar o potencial de adoção da agricultura irrigada no Brasil, em conformidade com o que foi desenvolvido no primeiro estudo<sup>17</sup>, além de distinguir a fração da atual área agrícola de sequeiro que apresenta potencial para ser irrigada (**intensificação**) e as áreas de pastagem com potencial para **expansão** da produção agrícola por meio do uso da irrigação, considerando o uso de água superficial.

A metodologia de tratamento de dados para obtenção de uma informação territorial suficientemente robusta e de abrangência nacional em relação aos recursos disponíveis e demandados no espaço rural para estimação das **áreas adicionais irrigáveis com água superficial, ou seja, de intensificação ou expansão, e com água subterrânea**, é constituída neste estudo por três eixos de processamento ilustrados pela **Figura 21**, a saber: Eixo 1 – Área agricultável; Eixo 2 – Demanda hídrica; e Eixo 3 – Disponibilidade hídrica.

**Figura 21.** Representação esquemática dos três eixos que compõem a variável territorial de irrigação.



\*AAI = área adicional irrigável

<sup>17</sup> “Análise territorial para o desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil” - Estudo realizado pela FEALQ no âmbito do Projeto de Cooperação Técnica IICA/BRA/08/002, sob demanda do então Ministério da Integração (MI). Finalizado em 2014.

De modo integrado, os três eixos indicados (**Figura 21**) são considerados chaves para o cômputo da área adicional irrigável.

O **primeiro eixo** tem o objetivo de gerar um mapa de **Área agricultável**, isto é, áreas para uso com a agricultura e pastagem no território brasileiro. Para isso aplicam-se filtros para a remoção de áreas com restrições físicas e ambientais sobre o mapa de áreas consolidadas atuais de agricultura e pastagem. Essa análise foi considerada como um primeiro eixo na composição da variável territorial de irrigação porque permite contabilizar as áreas que reúnem as condições físicas para adoção da agricultura e que poderiam ser potencialmente irrigadas, caso haja disponibilidade hídrica. Isso implica dizer que, em um momento posterior, é possível mensurar o quanto de fato apenas a disponibilidade hídrica passa a ser um fator limitante para adoção de sistemas irrigados em cada microbacia.

Em relação ao **segundo eixo**, o objetivo é gerar uma estimativa da **demanda hídrica** no interior de cada microbacia no Brasil. Essa estimativa envolve um conjunto de processamentos complexos, que vão desde a simulação do balanço hídrico de quatro diferentes culturas - milho, feijão, arroz e cana-de-açúcar – até a estimativa da vazão unitária de projeto. Esse componente, portanto, refere-se aos aspectos físicos da irrigação e são tratados, para todo o território, na escala de microbacias (Ottobacias 5k), com polígonos de área média de 2.100 hectares.

Por fim, o objetivo do **terceiro eixo** refere-se à **disponibilidade hídrica** que, por sua vez, é um dos dados de entrada das simulações e apresenta a quantidade de água superficial e subterrânea disponível à agricultura irrigada hoje. É importante notar que, para estimar tal disponibilidade, os usos consuntivos atuais são levados em consideração no caso da água superficial, bem como as outorgas existentes no caso da água subterrânea.

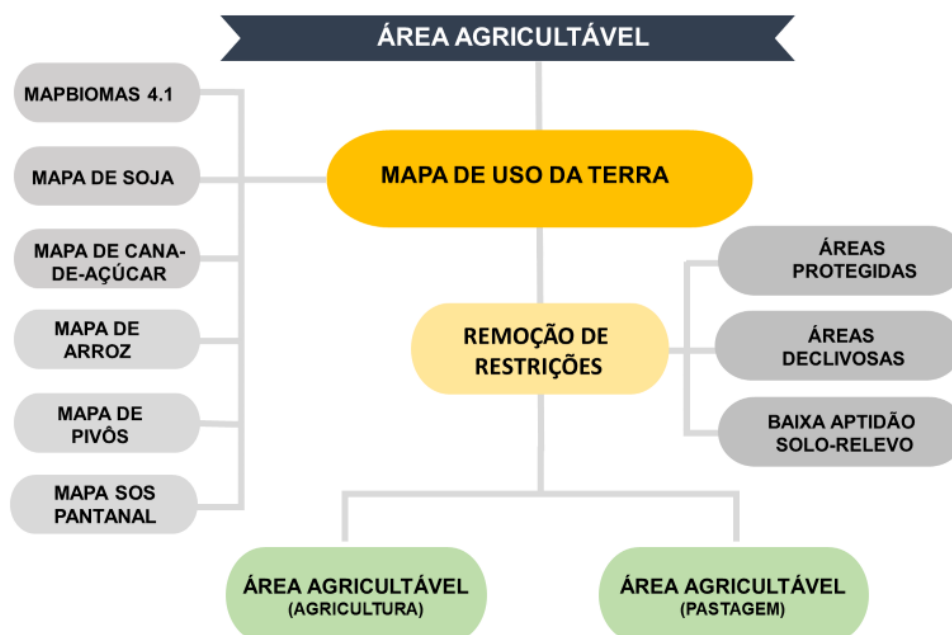
A partir dos resultados provenientes dos três eixos, foi então calculada a **área adicional irrigável** no Brasil, ou seja, áreas com disponibilidade hídrica para adoção da irrigação e que ainda não são irrigadas atualmente. Além disso, vale ressaltar que o estudo procura estimar a área adicional irrigável a partir da água superficial disponível, distinguindo as áreas com potencial de **intensificação de agricultura de sequeiro por intermédio da irrigação** e as áreas com potencial de **expansão da agricultura irrigada sobre pastagens consolidadas, e da água subterrânea**. Primeiramente, são obtidos os resultados de áreas adicionais irrigáveis de intensificação e de maneira consecutiva as áreas com potencial de expansão e por fim, às áreas adicionais com água subterrânea. Essa análise se tornou possível a partir dos resultados do componente de área agricultável.

Os itens seguintes apresentam os resultados obtidos com a aplicação dos procedimentos metodológicos para estimativa dos três componentes descritos, bem como para da área adicional irrigável.

### 3.1 Área agricultável de uso consolidado

De modo geral, como abordado no início deste capítulo, busca-se neste estudo gerar um mapa de **área agricultável** (Eixo 1), considerando para isso as áreas já com uso consolidado de agricultura e de pastagem. São utilizados para o cômputo desta variável um mapa de uso da terra e um de índice de aptidão agrícola, que considera as variáveis de solo e de relevo.

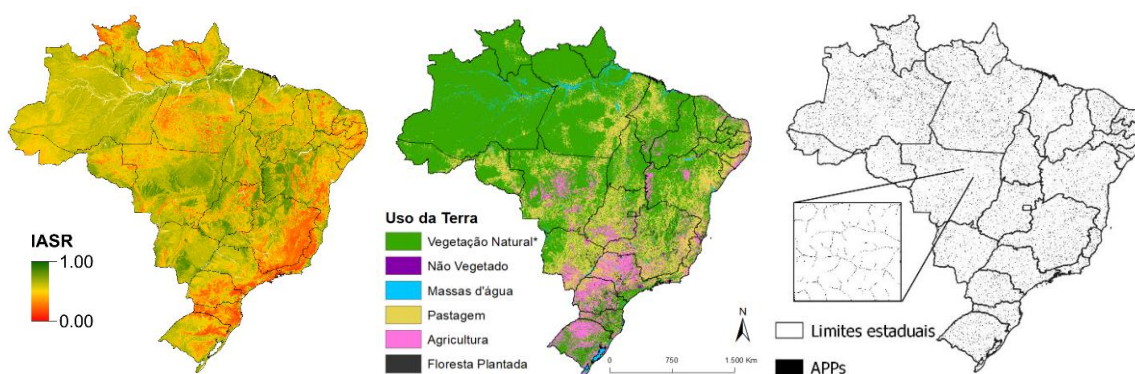
**Figura 22.** Representação esquemática da composição do eixo **área agricultável**.



Essa análise é importante para mensurar o quanto de fato há de área disponível para ser utilizada com agricultura, isto é, aquelas com uso consolidado em agricultura e pastagem em cada microbacia e com condições físicas para produção agropecuária.

Para a geração da área agricultável, três informações espaciais distintas foram combinadas: o uso da terra, a aptidão para solo e relevo (IASR) e as Áreas de Preservação Permanente (APP), como sintetizado pela **Figura 23**.

**Figura 23.** Dados utilizados para a geração da área agricultável

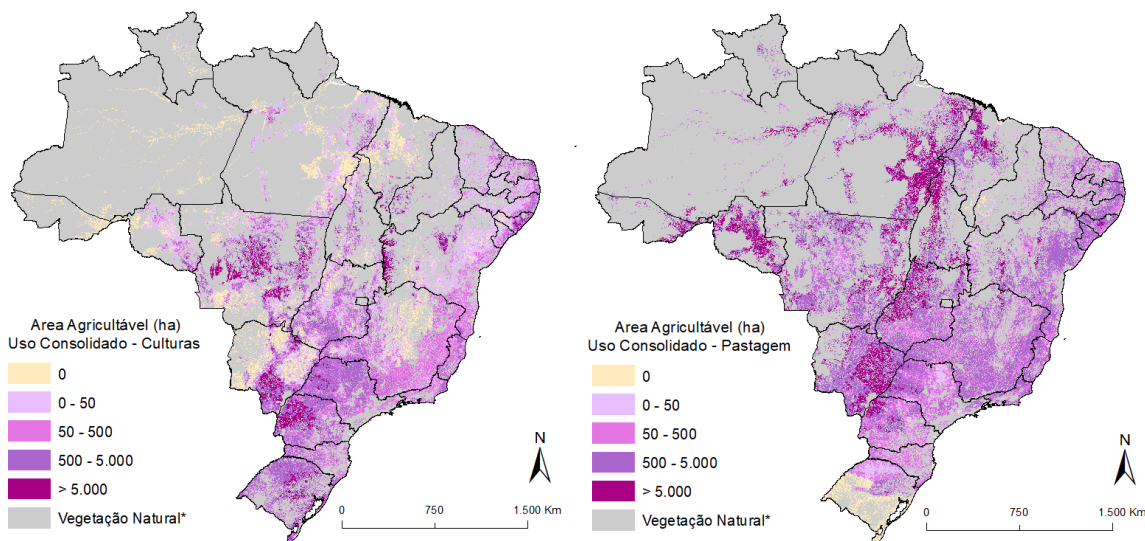


\*IASR: Índice de aptidão Solo e relevo

Primeiramente, a partir do mapa de uso da terra atual, apresentado no capítulo anterior, separa-se as classes de agricultura e de pastagem dos demais usos da terra. Na sequência, informações do ambiente físico são utilizadas para remover os locais que são inaptos para a expansão da agricultura irrigada tanto em área de pastagens como em áreas agrícolas. Nessa etapa, regiões com altitude acima de 1800 metros, as quais são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP) pelo Novo Código Florestal (Lei 12.651/2012), e locais com declividade acima de 25°, os quais são considerados Área de Uso Restrito pela referida lei, são removidas na contabilização da área agricultável. Na etapa seguinte, é utilizado o índice de aptidão do meio físico (descrito no capítulo anterior), considerando os componentes solo e relevo para identificação de áreas prioritárias à **intensificação** e **expansão** da área irrigada, ou seja, descontando áreas com baixa aptidão de solo-relevo.

Por fim, as Áreas de Preservação Permanente (APP), estando elas atualmente com cobertura vegetal nativa ou não, bem como áreas destinados a Unidades de Conservação (UC) de Proteção Integral, terras indígenas e quilombolas, também são descontadas (retiradas da análise), sendo gerado o mapa final de área agricultável. A **Figura 24** apresenta o mapa de área agricultável para o território brasileiro.

**Figura 24.** Área agricultável no Brasil, considerando as áreas consolidadas com agricultura (mapa da esquerda) ou com pastagem (mapa da direita).



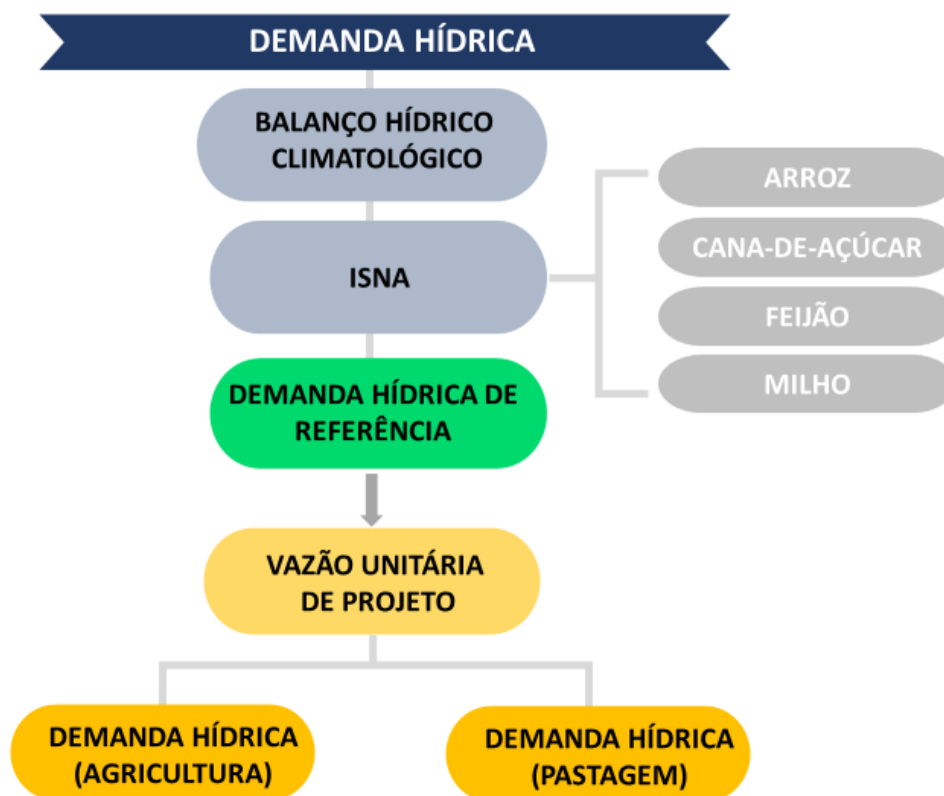
\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental e Reserva extrativista).

### 3.2 Demanda hídrica

No âmbito da demanda hídrica (Eixo 2), o principal resultado a ser alcançado diz respeito à vazão necessária em cada microbacia para atender, concomitantemente, aos usos consuntivos e à demanda apresentada pela agricultura (que se dá sob a forma de irrigação).

Os procedimentos para obtenção da demanda hídrica para as áreas consolidadas com agricultura e pastagens são ilustrados na **Figura 25**. Em linhas gerais, a quantidade de água necessária é estimada após a análise do **balanço hídrico climatológico (BHC)** e do **Índice de Satisfação à Necessidade de Água (ISNA)**, critérios que serão melhor definidos adiante e complementados no ANEXO I. Essas análises servem de base para indicar o período do ano mais apropriado para estimar a **demanda hídrica de referência**, que por sua vez, deve ser convertida em **vazão unitária de projeto** ( $m^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ ) ( $Q_u$ ), ou seja, a vazão necessária em um projeto de irrigação para suprir a demanda sob as condições climáticas de cada recorte geográfico. Esta vazão é calculada a partir da extrapolação da demanda hídrica da cultura, dada em  $mm \cdot dia^{-1}$  (Evapotranspiração potencial de referência - ETo).

**Figura 25.** Síntese dos procedimentos para estimativa da demanda hídrica.



Para a obtenção do ISNA e, conseqüentemente, da demanda hídrica de referência, são utilizados parâmetros de quatro diferentes culturas, a saber: arroz, cana-de-açúcar, feijão e milho<sup>18</sup>.

O presente tópico busca apresentar os principais resultados obtidos através da modelagem climática, para determinar a demanda hídrica voltada a agricultura irrigada, ou seja, para estimar o ISNA, sua interpretação para a determinação da data de semeadura de cada cultura, e, por fim, a evapotranspiração potencial de referência ( $ETo$ ,  $mm.day^{-1}$ ) (demanda hídrica de referência) para cálculo das vazões unitárias de projeto e demanda hídrica por microbacia.

### **3.2.1 Índice de Satisfação à Necessidade de Água e decêndio de semeadura**

De forma sintética, como o objetivo é determinar a demanda hídrica para a agricultura irrigada, um dos resultados fundamentais diz respeito à vazão unitária de projeto ( $Q_u$ ,  $m^3.s^{-1}.ha^{-1}$ ). Para esclarecimento inicial, vale destacar que a vazão unitária

<sup>18</sup> A escolha dessas quatro culturas se deu em função da representatividade da área cultivada no território, de acordo com dados do IBGE (2019). Sendo que a soja, também indicada com significativa área cultivada, não foi adotada pois observou-se que a cultura da soja apresenta demanda hídrica muito semelhante à cultura do milho e por conseqüência os dados de vazão unitária também.

de projeto se refere ao volume de água requerido, por unidade de área e de tempo, para o equipamento de irrigação.

A vazão unitária de projeto é calculada pela extrapolação da demanda hídrica da cultura, dada em  $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  (Evapotranspiração potencial da cultura de interesse - ETo), e pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$Qu_{c,s} = \frac{ETo \cdot Kc_c \cdot If_s}{360 \cdot t_s} \quad (7)$$

Análise dimensional:

$$\frac{m^3}{360 \cdot s \cdot ha} = \frac{\frac{mm}{d} \cdot \frac{1L}{m^2} \cdot \frac{10^4 m^2}{ha} \cdot \frac{m^3}{10^3 L}}{\frac{h}{d} \cdot \frac{3600s}{h}} \quad (8)$$

em que ETo se refere à **evapotranspiração de referência** ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $Kc_c$  ao coeficiente de cultura, para a cultura  $c$  no estágio fenológico referente ao período crítico;  $If_s$  o fator de ineficiência do tipo de irrigação (método) - sendo considerados 2 métodos de irrigação: (i) irrigação por superfície ( $s=1$ ); (ii) irrigação pressurizada ( $s=2$ ). Por fim,  $t_s$  se refere ao tempo de irrigação ( $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ ), tomado para cada método.

A partir da fórmula, depreende-se que as simulações climáticas têm como finalidade a estimativa da variável ETo para cada microbacia, ou seja, a evapotranspiração de referência - único fator variável da fórmula de cálculo da vazão unitária de projeto ( $Qu_{c,s}$ ), pois os outros parâmetros:  $Kc_c$ ,  $If$  e  $t_s$  são dados de entrada determinados de acordo com a FAO e com a Agência Nacional de Águas (ANA).

No entanto, para cada microbacia é possível calcular um valor de evapotranspiração de referência para cada dia do ano, o que não se revela útil para o refinamento da variável. Para que essa informação tenha sentido prático, é preciso tomar como parâmetro a evapotranspiração potencial do dia ou conjunto de dias **mais** representativos, ou seja, a evapotranspiração potencial no período adequado do ano. Portanto, desdobram-se como objetivos iniciais da modelagem climática a estimativa: (i) do dia correto para tomar como referência, o qual é obtido pela análise do ISNA por meio do método de Thornthwaite e Mather (1955) (TM); e (ii) da evapotranspiração de referência para esse período, que por sua vez é calculada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (PM FAO 56).

Para definição da data de semeadura das culturas, a solução metodológica adotada consiste em simular o BHC para semeaduras em todos os decêndios ( $d$ ) do ano ( $d=1, 2, 3, \dots, 35$  e  $36$ ), sendo que um decêndio se refere a um período de 10 dias corridos. Assim, para cada decêndio é extraído o Índice de Satisfação da Necessidade de Água



**Crítico** ( $ISNA_c$ ) da cultura. Para compreender a definição de  $ISNA_c$ , é necessário primeiramente o cálculo do Índice de Satisfação à Necessidade de Água ( $ISNA$ ).

Para o cálculo do  $ISNA$ , é feita a relação entre a evapotranspiração real ( $ET_r$ ) estimada pelo modelo de TM (1955) e evapotranspiração potencial da cultura ( $ET_c = ET_o * K_c$ ) calculada pelo método de PM FAO 56 – representado pela seguinte relação:

$$ISNA = ET_{rel} = \frac{ET_r}{ET_o * K_c} \quad (9)$$

A partir da relação acima, observa-se que  $ISNA$  pode ser calculado para qualquer escala temporal, pois ambas as variáveis que o compõem podem ser estimadas na escala diária, e, portanto, é possível extrapolar a fórmula para que seja compreendido um maior intervalo temporal, como segue:

$$ISNA_{p,c} = \frac{\sum_{m=a}^b ET_{r,p,c_m}}{\sum_{m=a}^b ET_{o_m} * K_{c_m}} \quad (10)$$

onde  $a$  é o limite inferior e  $b$  é o limite superior dos dias após a semeadura ( $m$ ), intervalo que compreende a fase fenológica  $p$  para a cultura  $c$ .

Para melhor compreensão, apresenta-se o exemplo a seguir para a cultura de milho, em que considerando o ciclo da cultura, é possível calcular os  $ISNA$  para as diferentes fases fenológicas. Para isso, basta ajustar os valores de  $a$  e  $b$  para os intervalos de interesse, considerando os momentos de implantação ( $p=1$ ), florescimento ou desenvolvimento vegetativo ( $p=2$ ), enchimento de grão ou maturação ( $p=3$ ) e ciclo ( $p=4$ ) da cultura indicadora  $c$ : milho ( $c=1$ ).

**Tabela 5.** Parâmetros de cultura do Milho ( $c=1$ )

	<b>Necessidade de irrigação para MILHO</b>			
	<b><math>ISNA_{1,1}</math></b>	<b><math>ISNA_{2,1}</math></b>	<b><math>ISNA_{3,1}</math></b>	<b><math>ISNA_{4,1}</math></b>
	<b>Implantação</b>	<b>Florescimento</b>	<b>Enchimento de grãos</b>	<b>Ciclo (semeadura a colheita)</b>
Fase ( $p$ )	1	2	3	4
Início (DAS)	$a=0$	$a=19$	$a=56$	$a=0$
Fim (DAS)	$b=19$	$b=55$	$b=95$	$b=95$
$K_c$	0,3	0,3 – 1,2	1,2	1,2 – 0,6

Portanto, considerando os parâmetros acima, as equações para o  $ISNA$  para as diferentes fases fenológicas da cultura de milho são as seguintes:

$$ISNA_{1,1} = \frac{\sum_{m=0}^{19} ETr_{1,1m}}{\sum_{m=0}^{19} ETO_m * Kc_{1m}} \quad (11)$$

$$ISNA_{2,1} = \frac{\sum_{m=19}^{55} ETr_{2,1m}}{\sum_{m=19}^{55} ETO_m * Kc_{2m}} \quad (12)$$

$$ISNA_{3,1} = \frac{\sum_{m=56}^{95} ETr_{3,1m}}{\sum_{m=56}^{95} ETO_m * Kc_{3m}} \quad (13)$$

$$ISNA_{4,1} = \frac{\sum_{m=0}^{95} ETr_{4,1m}}{\sum_{m=0}^{95} ETO_m * Kc_{4m}} \quad (14)$$

ou seja, o ISNA é um índice que pode ser calculado para qualquer intervalo temporal, tanto para um único dia quanto para todo o ciclo. Sendo assim, para entender o ISNA<sub>c</sub>, basta a compreensão sobre o intervalo tomado para esta análise específica. Nesse caso, o indicador busca representar a quantidade de água disponível no período crítico das culturas, ou seja, o período em que a cultura se encontra no seu estágio de desenvolvimento de maior demanda hídrica, e que é o período que coincide com a maior sensibilidade à deficiência hídrica, época do maior valor do índice de área foliar e do Kc do ciclo, segundo os dados da FAO. Esse período crítico varia de acordo com a fenologia, duração do ciclo e estágios de desenvolvimento de cada cultivo.

Os valores adotados de **Kc** (coeficiente de cultura) se referem ao disponibilizado pelo boletim 56 da FAO<sup>19</sup>, subdivididos em Kc<sub>ini</sub> (coeficiente de cultura para a fase inicial do ciclo), Kc<sub>mid</sub> (coeficiente de cultura para a fase intermediária do ciclo da cultura) e Kc<sub>end</sub> (coeficiente de cultura para a última fase do ciclo), bem como os intervalos fenológicos descritos por L<sub>ini</sub>, L<sub>dev</sub>, L<sub>mid</sub> e L<sub>late</sub>, descritos na **Tabela 6** e representados pelas curvas da **Figura 26**. Os períodos críticos adotados para cada cultura são apontados na **Tabela 6**, e se assemelham aos limites L<sub>mid</sub> e L<sub>late</sub> descritos na **Tabela 7**, representando o período de maior Kc das culturas, ou seja, coincidente com a época do florescimento (exceto para a cana-de-açúcar<sup>20</sup>). Por fim, a **Figura 27** apresenta a estruturação de uma curva de Kc genérica e seus pontos focais.

<sup>19</sup> <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e0b.htm>

<sup>20</sup> No caso da cana de açúcar se adotou como período do crítico

**Tabela 6.** Intervalos fenológicos e coeficientes de cultura para as culturas: arroz, cana-de-açúcar, feijão e milho.

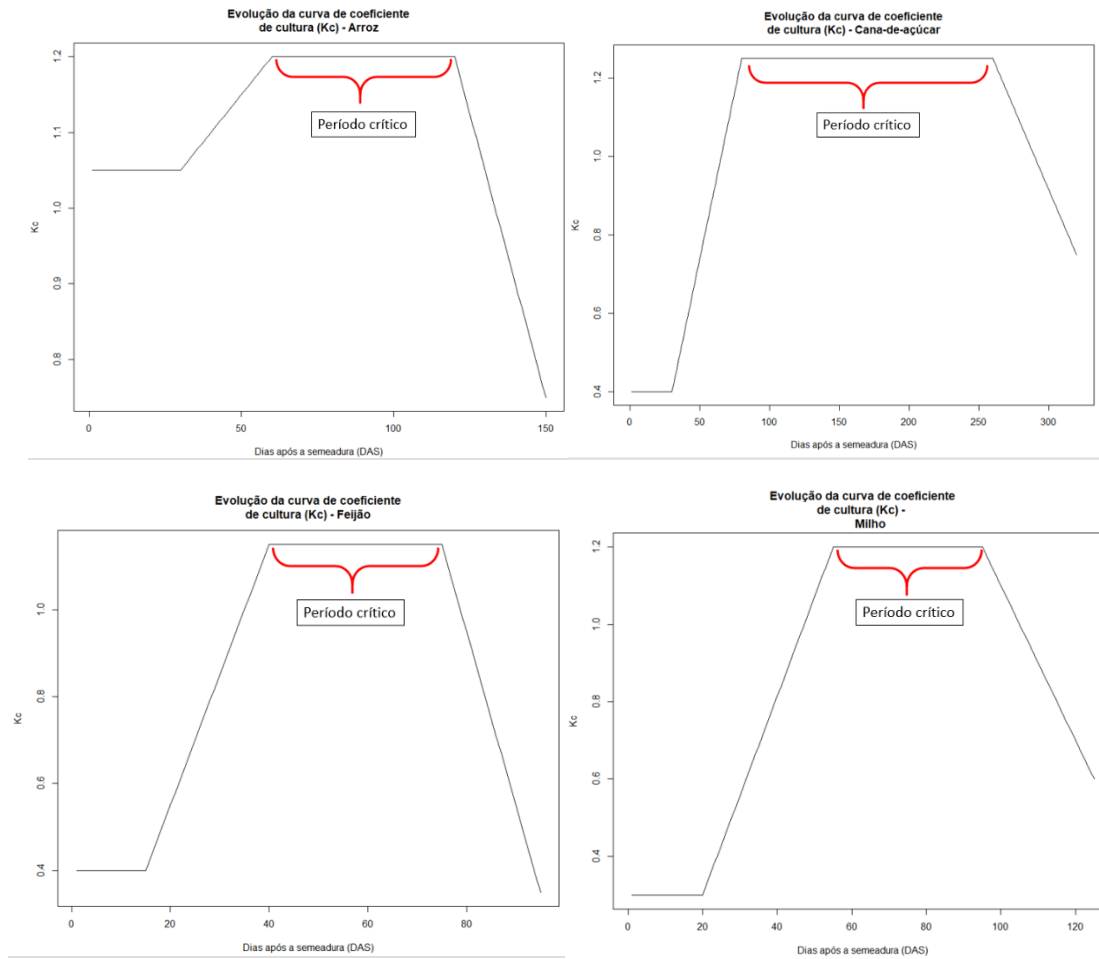
Cultura	L <sub>ini</sub>	L <sub>dev</sub>	L <sub>mid</sub>	L <sub>late</sub>	Total	KC <sub>ini</sub>	KC <sub>mid</sub>	KC <sub>end</sub>
<b>Arroz</b>	0	30	60	120	150	1.05	1.2	0.75
<b>Cana-de-açúcar</b>	0	30	80	260	320	0.4	1.25	0.75
<b>Feijão</b>	0	15	40	75	95	0.4	1.15	0.35
<b>Milho</b>	0	20	55	95	125	0.3	1.2	0.6

Fonte: Boletim FAO 56

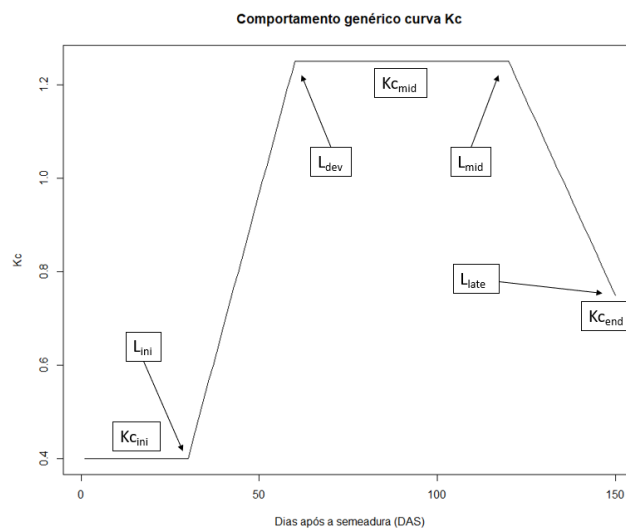
**Tabela 7.** Intervalo para o período crítico das culturas em função dos dias após a semeadura (DAS).

Cultura	Limite inferior (DAS) (L <sub>dev</sub> )	Limite superior (DAS) (L <sub>late</sub> )
<b>Arroz</b>	60	120
<b>Cana-de-açúcar</b>	80	260
<b>Feijão</b>	40	75
<b>Milho</b>	55	95

**Figura 26.** Evolução da curva de coeficiente de cultura ao longo das fases fenológicas das culturas: arroz, cana-de-açúcar, feijão e milho.



**Figura 27.** Curva genérica de evolução do Kc ao longo das fases fenológicas



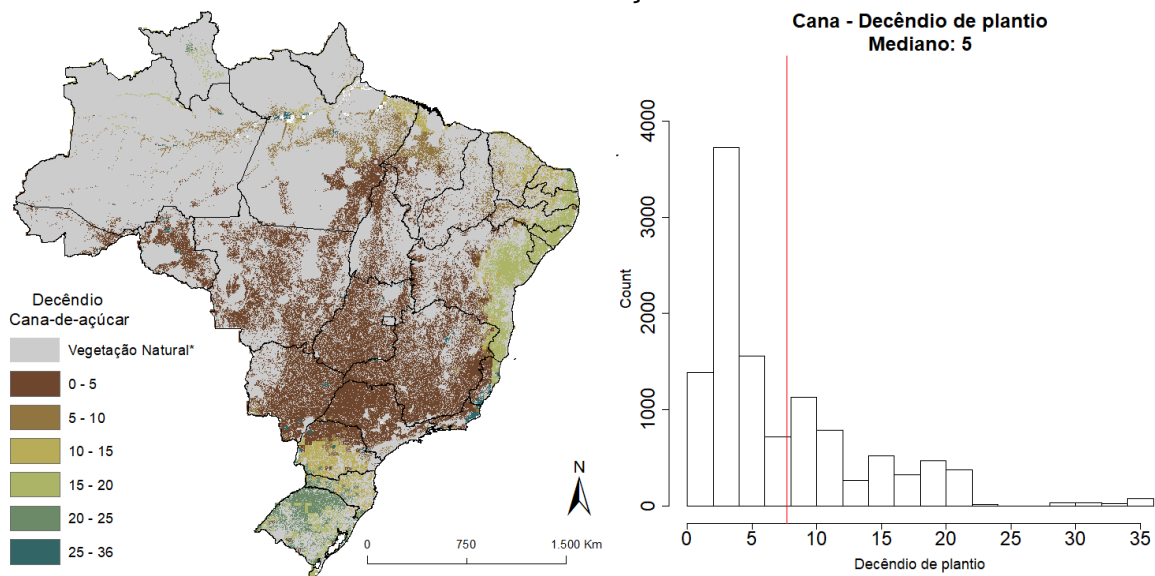
Por fim, ao término das simulações para cada um dos 36 decêndios do ano, aquele que deve ser tomado como referência é o que apresente o menor valor de ISNA<sub>C</sub>. Ou seja, esse menor valor deve representar uma semeadura realizada na época de menor satisfação hídrica durante o período de Kc máximo e por isso, capaz de nortear o dimensionamento do sistema de irrigação com maior segurança.

Feitas essas considerações metodológicas iniciais, a seguir são ilustrados os resultados sobre o **decêndio de semeadura de referência** adotado para as culturas de cana-de-açúcar, feijão, milho e arroz.

### Cana-de-açúcar

Para a cultura de cana-de-açúcar, na maior parte do território, especialmente nas suas regiões produtoras, os decêndios de plantio variaram entre o 3º e 6º período, como mostra a **Figura 28** (mapa e histograma). Na prática, esse período representa a época de plantio entre os meses de outubro e novembro.

**Figura 28.** Distribuição espacial e histograma do decêndio de plantio de referência para cana-de-açúcar



*\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA -Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista)*

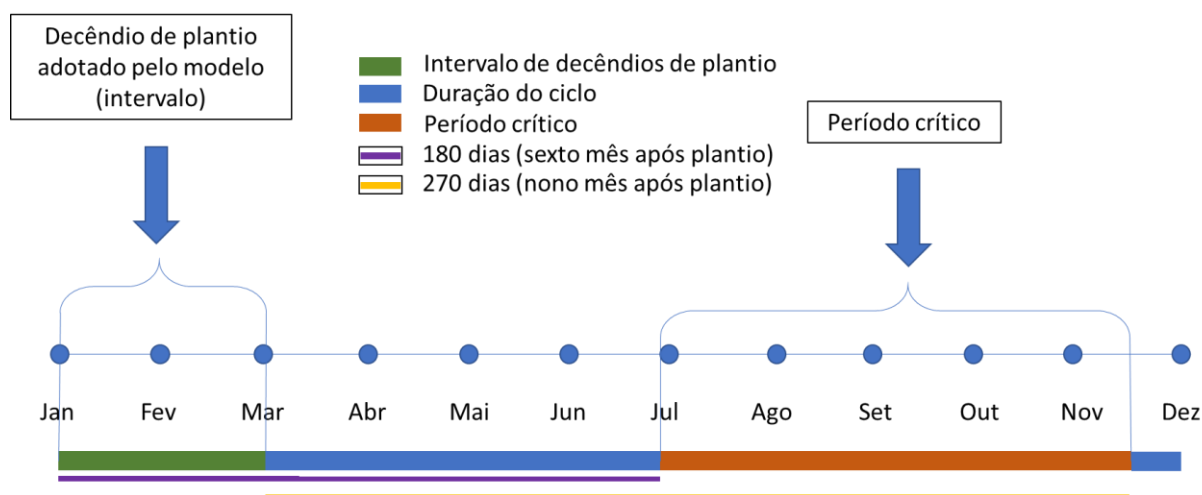
Para melhor compreensão, vale recordar que o período crítico para a cana-de-açúcar ocorre no intervalo de tempo entre o sexto e o nono mês (após o plantio para cana planta ou último corte para cana soca), período no qual a cultura passa pela fase de crescimento vegetativo intenso e máxima evapotranspiração.

Dessa forma, a modelagem utilizada captura a data de plantio (entre o 3º e 6º decêndio) ao longo do ano, ao passo que o período crítico (sexto a nono mês de ciclo) coincide com a época do ano de menor disponibilidade hídrica, e, portanto, menor ISNA

crítico. Em outras palavras, a título de exemplo, com os resultados da modelagem da cana-de-açúcar apontando para a data de plantio entre o 3º e 6º decêndios (período entre 30 e 60 dias julianos), significa que o plantio está ocorrendo nos meses de janeiro e março<sup>21</sup>.

Com o plantio sendo realizado nessas datas, o período crítico, que se estende do dia 180 até o dia 270 (90 dias corridos) após o início do ciclo, coincidirá com os meses de julho até novembro. Para chegar a essa conclusão, basta somar 180 dias ao decêndio de plantio, e assim encontra-se o dia juliano de início do período crítico, que no caso tem seu limite inferior no mês de julho. Para o limite superior desse intervalo, basta somar 270 dias, que significa o término do período crítico. A **Figura 29** ilustra o procedimento.

**Figura 29.** Esquema de obtenção do período crítico a partir do decêndio de plantio para cana-de-açúcar

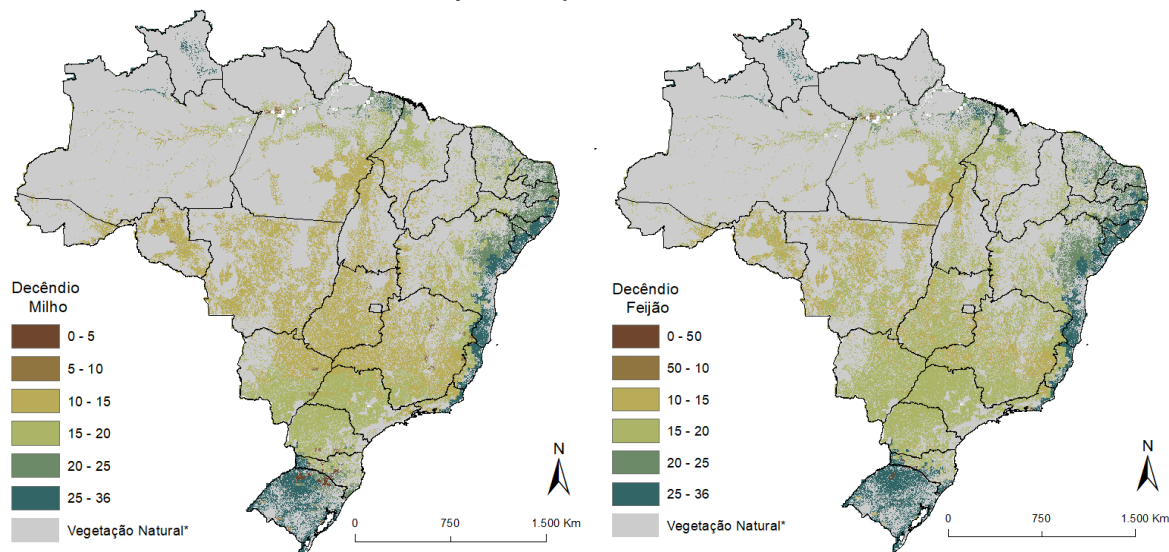


## Milho e feijão

Para as culturas de feijão e de milho, observou-se significativa proximidade nos decêndios encontrados, especialmente devido ao tamanho do ciclo de ambas as culturas ser próximo (95 dias para o feijão e 120 dias para o milho). Na maior parte do território, e na quase totalidade das regiões produtoras, o decêndio de semeadura foi o 15º, como mostram a **Figura 30** e **Figura 31**, o que significa uma semeadura realizada no mês de maio.

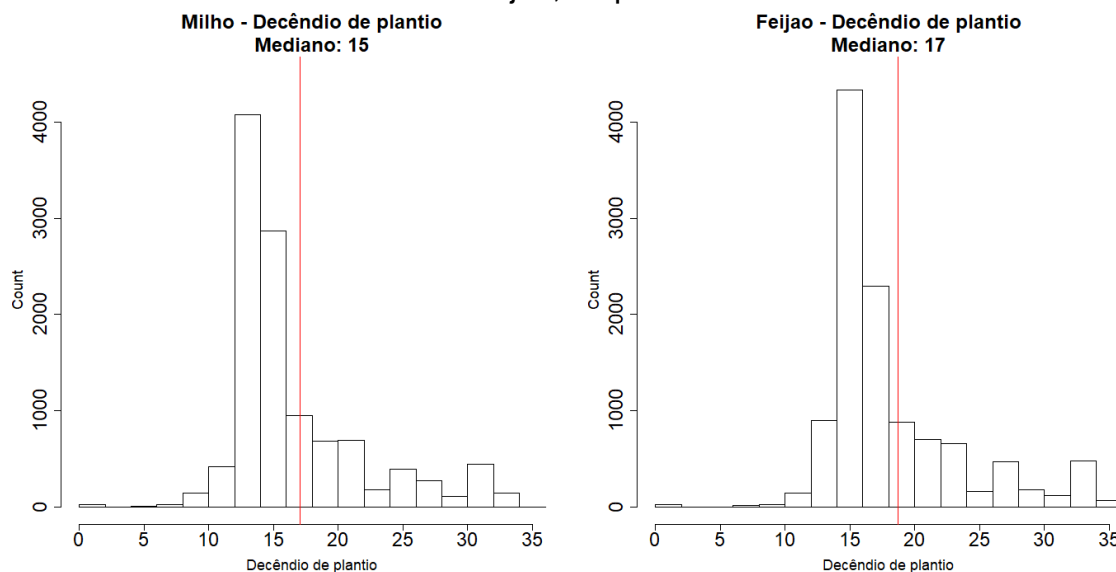
<sup>21</sup> Dia 290 equivale ao dia 16 de outubro e dia 320 equivale ao dia 15 de novembro.

**Figura 30.** Distribuição espacial do dêcêndio de plantio de referência para milho e feijão, respectivamente.



*\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA -Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista)*

**Figura 31.** Histograma do dêcêndio de semeadura de referência para as culturas de milho e feijão, respectivamente.

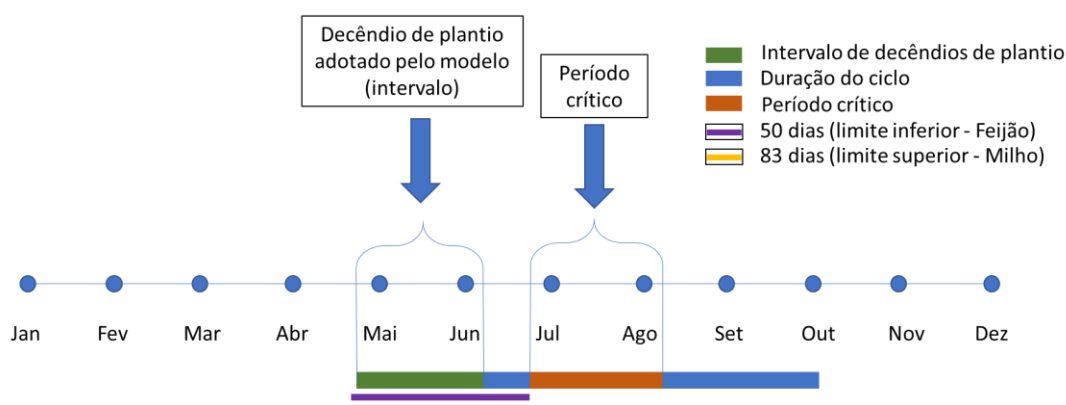


Em uma breve contextualização, vale lembrar que o período crítico para a cultura de feijão ocorre no intervalo entre o 50º e 67º dia após a semeadura, enquanto para o milho este período ocorre entre o 67º e 83º dia. É neste período crítico que ambas as culturas se encontram na fase de florescimento ou inversão de drenos e, portanto, máxima evapotranspiração e susceptibilidade à estresse hídrico.

Deste modo, a partir do modelo climático utilizado é possível capturar a data de plantio (no caso, 15<sup>o</sup> decêndio) ao longo do ano, de modo que o período crítico coincide com a época do ano de menor disponibilidade hídrica, e, portanto, menor ISNA crítico. Isso significa que com a data de plantio apontando para o 15<sup>o</sup> decêndio (ou dia juliano 150), a semeadura está ocorrendo nos meses de maio e junho<sup>22</sup>.

Com a semeadura sendo realizado nessa época do ano, o período crítico, que se estende do dia 50 até o dia 66 para o feijão e do dia 67 até o dia 83 para o milho, coincidirá com os meses de julho até agosto. Para melhor compreensão, basta somar 50 dias ao decêndio de plantio, e assim encontrar o dia juliano de início do período crítico, que no caso tem seu limite inferior no mês de julho. Para o limite superior desse intervalo, basta somar 83 dias, que significa a data máxima para término do período crítico. A ilustra o procedimento.

**Figura 32.** Esquema de obtenção do período crítico a partir do decêndio de plantio para feijão e milho



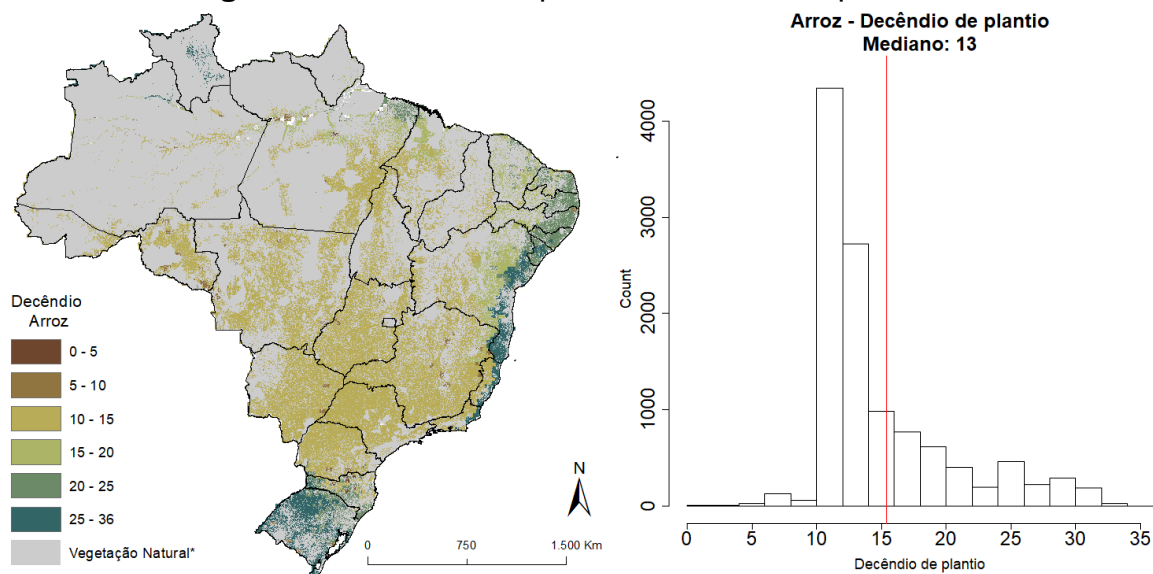
## Arroz

Para a cultura do arroz, que possui ciclo intermediário em relação à cana-de-açúcar e outros cereais convencionais, na maior parte do território o decêndio de plantio apontado esteve entre o 10<sup>o</sup> e 14<sup>o</sup>, porém nas regiões produtoras, especialmente no Rio Grande do Sul, o decêndio de plantio foi o 23<sup>o</sup>, como mostra a **Figura 33**, o que na prática representa a época de semeadura em agosto.

<sup>22</sup> Dia 150 equivale ao dia 29 de maio



**Figura 33.** Dêcêndio de plantio de referência para arroz.



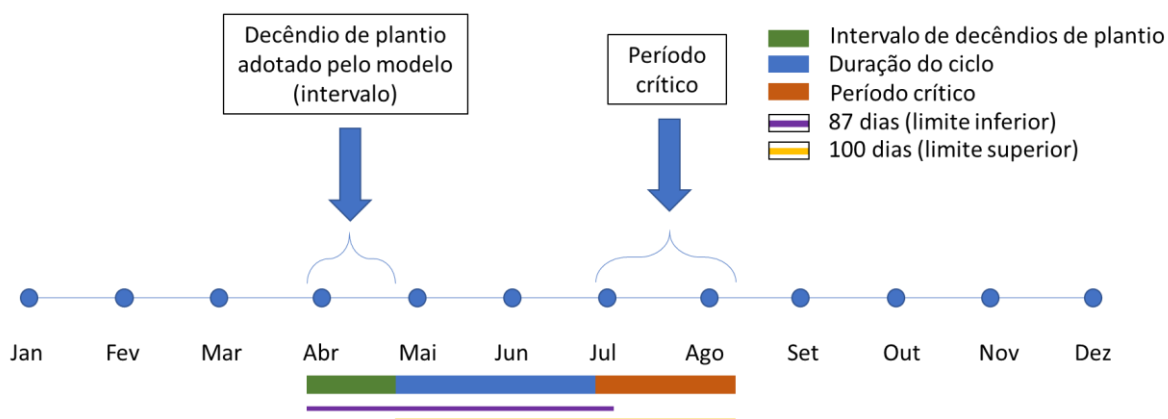
*\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA -Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista)*

O período crítico para o arroz ocorre no intervalo entre o 84º e o 100º dia após a semeadura, no qual a cultura passa pela fase de florescimento ou inversão de drenos e, portanto, máxima evapotranspiração e susceptibilidade ao estresse hídrico.

A modelagem climática adotada no estudo captura a data de plantio do arroz (13º decênio) ao longo do ano, de modo que o período crítico (87º ao 100º dia após a semeadura) coincide com a época do ano de menor disponibilidade hídrica e, portanto, menor ISNA crítico. Vale pontuar que, nas regiões produtoras de arroz há uma boa distribuição pluviométrica no decorrer do ano, e por isso o ISNA crítico mínimo selecionado ainda é um valor alto. Esse aspecto evidencia uma dinâmica hídrica particular, em que a época do ano indicada para dimensionar o sistema de irrigação é uma época úmida – neste caso é importante uma análise simultânea deste mapa com o mapa de evapotranspiração.

Neste caso, obtendo a data de plantio para o arroz, no qual a modelagem aponta para o 13º decênio (ou dia juliano 130), entende-se na realidade que o modelo está apontando para o plantio no mês de maio. Com o plantio sendo realizado nessa data, o período crítico, que se estende do dia 87 até o dia 100 após o início do ciclo, coincidirá com os meses de julho até agosto (para chegar à essa conclusão, basta somar 87 dias ao decênio de plantio, e assim, encontrará o dia juliano de início do período crítico, que no caso tem seu limite inferior no mês de julho. Para o limite superior desse intervalo, basta somar 100 dias, que significa o término do período crítico). A **Figura 34** ilustra o procedimento.

**Figura 34.** Esquema de obtenção do período crítico a partir do decêndio de semeadura da cultura de arroz.



### 3.2.2 Evapotranspiração potencial da cultura de interesse

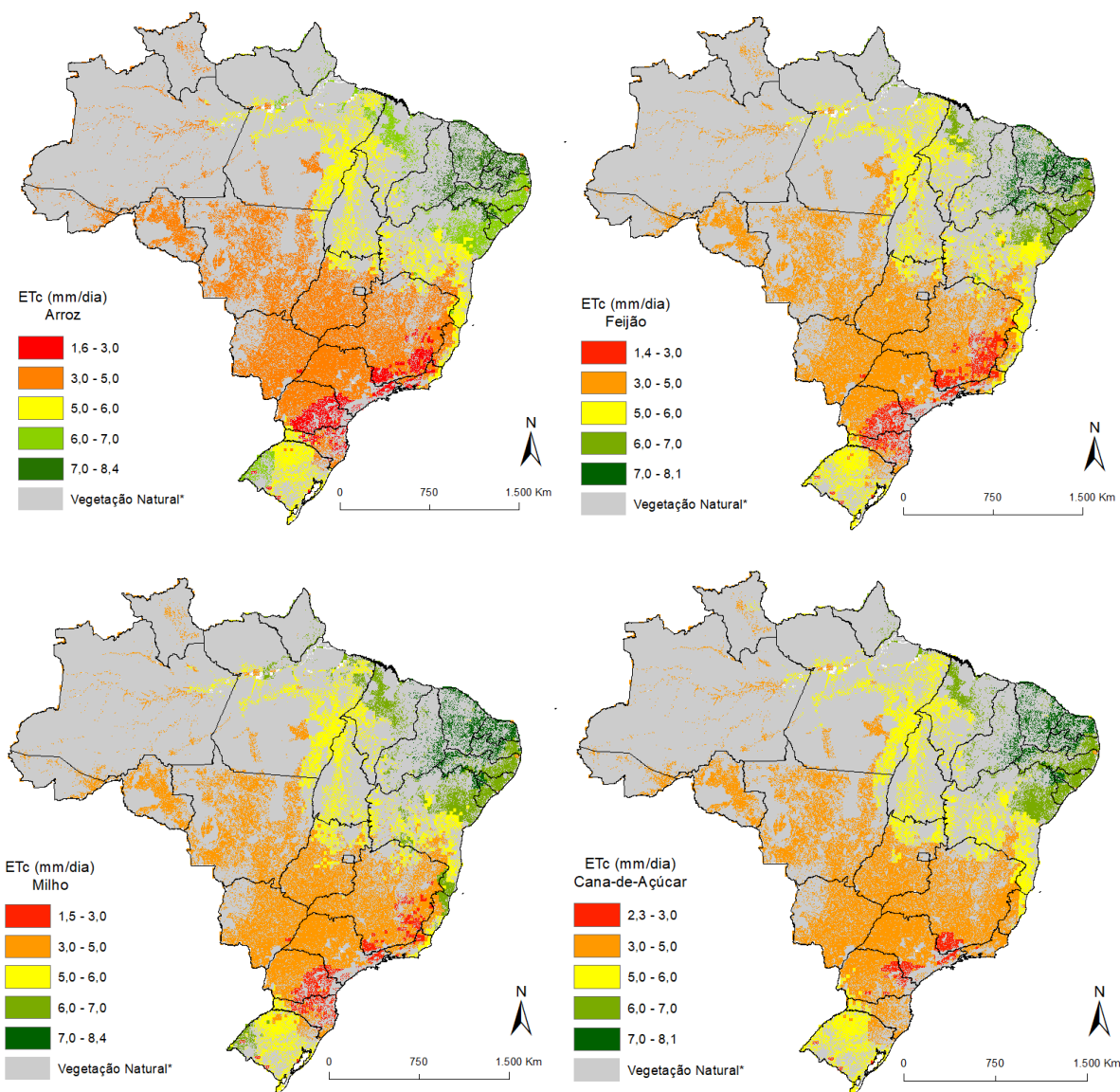
A partir da definição do decêndio de plantio/semeadura para as culturas de cana-de-açúcar, feijão, milho e arroz, realiza-se uma última simulação do BHC, a qual utiliza esse decêndio como data de semeadura para o ciclo de cada cultura. Nesse caso, nota-se que é a simulação final que fornece o valor de **evapotranspiração de cultura de referência**, que por sua vez é utilizada no cálculo de vazão unitária de projeto. A data de semeadura é uma informação fundamental para a composição da vazão unitária de projeto, pois ao longo do ano há grande amplitude nessa variável e o valor adotado deve ser preciso quanto à época do ano, de modo a evitar épocas úmidas. Durante as simulações para a estimativa da vazão unitária de projeto, ao considerar valores de evapotranspiração no período de menor ISN<sub>Ac</sub> gera-se, por consequência, uma alta evapotranspiração potencial, configurando um cenário mais conservador no sentido de estimar a demanda hídrica.

Essa situação se justifica termodinamicamente, uma vez que o período de **maior seca** e, conseqüentemente de **menor umidade relativa**, é aquele com **menor quantidade de água no sistema** (atmosfera-solo-planta), o que por sua vez leva à **maior amplitude térmica**, ou seja, temperaturas muito altas durante o dia e muito baixas durante a noite. Deste modo, considerando esses dois fatores principais, temperatura e umidade relativa, temos para a época seca uma combinação que resulta em maior evapotranspiração potencial, especialmente devido à maior atividade metabólica induzida por altas temperaturas, em conjunto com o baixíssimo potencial da água no ar atmosférico, favorecendo a saída de água pelos estômatos.

Nesta perspectiva, o método adotado para cálculo da evapotranspiração potencial teórica de referência visou a estimativa do **valor médio da evapotranspiração potencial de cada cultura durante o período crítico**. A evapotranspiração potencial

média para arroz, cana-de-açúcar, feijão, milho, respectivamente, são apresentados de forma espacial através da **Figura 35** para o Brasil.

**Figura 35.** Evapotranspiração potencial para cana-de-açúcar, feijão, milho e arroz.



*\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA -Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista)*

De um modo geral, nota-se significativa similaridade geográfica entre os resultados espacializados de evapotranspiração potencial. O nordeste brasileiro, seguido da região norte, são os locais onde se encontram as maiores evapotranspirações potenciais, e, a partir do estado de Minas Gerais em direção ao sudeste do Brasil, encontram-se as menores evapotranspirações potenciais, devido à maior umidade e às menores temperaturas médias ao longo do ano. Esse resultado indica grande acurácia do modelo climático adotado no estudo, o qual foi capaz de capturar em diversos cenários de

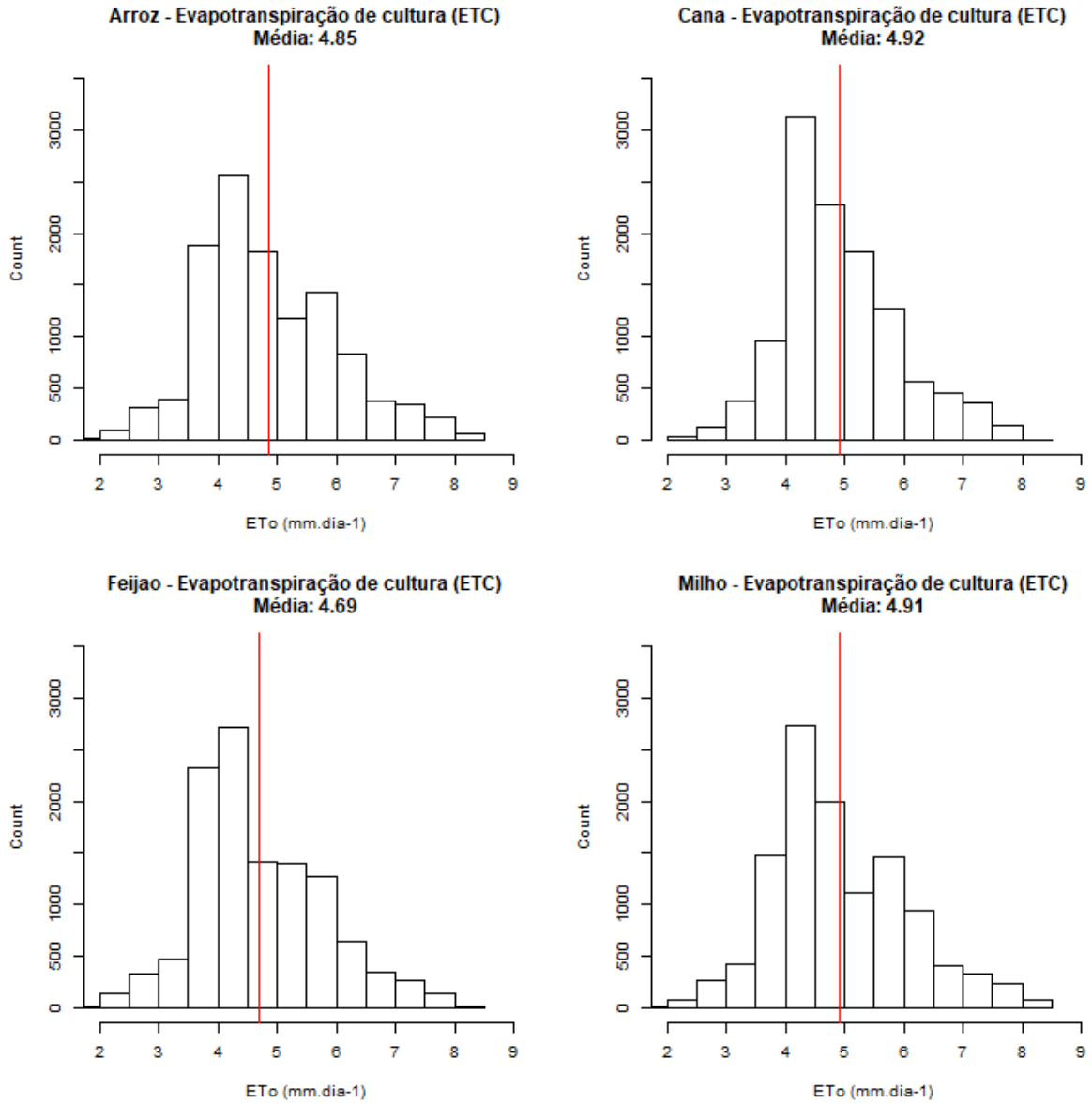
parametrização a convergência do aspecto climatológico. Vale enfatizar que, apesar da semelhança geográfica, o que torna os mapas diversos entre si é o detalhe trazido pela fenologia de cada cultura, que pelos diferentes coeficientes, apresentam diferentes escalas de evapotranspiração, especialmente no período crítico. Para a cana-de-açúcar, em todos os cenários nota-se expressiva superioridade na escala, ao passo que, para feijão e arroz, nota-se valores intermediários.

Esta geografia observada define algumas concentrações (manchas) espaciais, que partem da região do semiárido, mais crítica, e tornam-se mais brandas à medida que se distanciam em direção ao sul do país. As principais manchas observadas são: (i) da região do semiárido, que pelas altas temperaturas e baixa umidade relativa, torna-se o local com maior evapotranspiração potencial de cultura, em torno de  $8 \text{ mm.dia}^{-1}$ ; (ii) do bioma cerrado e áreas imediatas ao anel do semiárido, que com suas épocas do ano bem definidas, verões úmidos e invernos secos, tornam-se regiões de evapotranspiração média, em torno de  $6 \text{ mm.dia}^{-1}$ ; (iii) da região sudeste do país, que contrasta com o bioma cerrado pela diferença do regime de chuvas – o que torna essa região mais úmida e com temperaturas mais amenas, apresentando as menores valores médios de evapotranspiração, em torno de  $4 \text{ mm}$ ; e por fim, (iv) da região sul do país, que indica certa inversão à tendência do restante do país, devido à presença de chuvas durante o ano todo, e portanto, fazendo com que os sistemas vegetais se mantenham com taxas de transpiração elevadas ao longo do ano todo.

As diferenças nos valores absolutos para cada mapa podem ser observadas pela análise da **Figura 36**.

No caso da cana-de-açúcar, por ser uma cultura de maior exigência hídrica e com maior evapotranspiração potencial, os valores estão agrupados em torno da média  $4,74 \text{ mm.dia}^{-1}$ . Para a cultura de milho e de feijão, a média gira em torno de  $4,55 \text{ mm.dia}^{-1}$ , ao passo que para o arroz fica em torno de  $4,6 \text{ mm.dia}^{-1}$ . Esses valores específicos por cultura, em combinação com os métodos de irrigação, compõem as diferentes vazões unitárias de projeto, que por sua vez serão utilizadas para compor a demanda hídrica por microbacia.

**Figura 36.** Histogramas dos resultados obtidos de evapotranspiração potencial de cultura



### 3.2.3 Vazão unitária de projeto

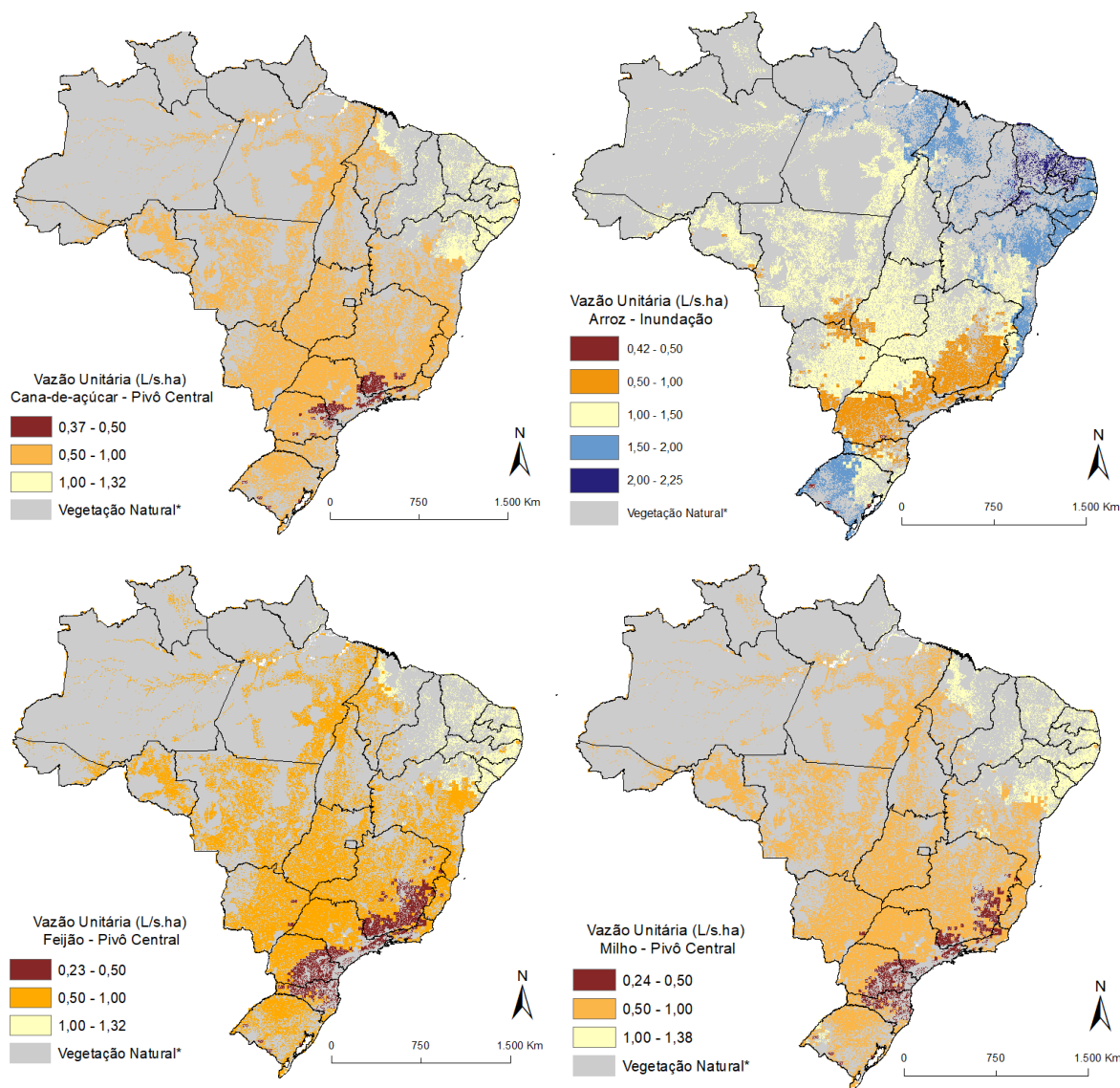
Por meio dos *outputs* gerados, determinando a evapotranspiração de referência, foi possível realizar o cálculo de vazão unitária de projeto, tomando a parametrização anteriormente descrita para cada método de irrigação.

Os métodos de irrigação referidos neste estudo como **sistema de irrigação por superfície** e **sistema de irrigação pressurizada**, buscam representar dois grandes tipos de práticas de irrigação presentes no território brasileiro. O primeiro caso retrata os métodos com menor eficiência do uso da água, como sistemas de inundação e sulcos; já no segundo estão os sistemas como pivôs centrais, aspersão, microaspersão e gotejamento.

Para tanto, adotou-se o tempo de irrigação de 16 horas para o **sistema de irrigação por superfície** (tipologia 1) (jornada de trabalho máxima para dois trabalhadores, por ser um sistema que necessita de operações constantes ao longo do dia); 21 horas para **irrigação pressurizada** (tipologia 2) para calcular a **potência requerida mínima**. Sobre o fator de eficiência dos métodos de irrigação utilizados nas simulações tem-se: (i) irrigação por superfície (representada pelo sistema de irrigação do tipo inundação): 65% e (ii) irrigação pressurizada (representada pelo sistema de irrigação do tipo pivô central): 90%.

Os resultados de vazão unitária de projeto para as culturas de arroz, cana-de-açúcar, feijão e milho, de acordo com os valores de evapotranspiração média adotados e, conforme os dois métodos de irrigação, são apresentados espacialmente na **Figura 37**, considerando o território brasileiro.

**Figura 37.** Distribuição espacial da vazão unitária e projeto para as culturas da cana-de-açúcar, feijão e milho com sistema de irrigação pressurizado e arroz com sistema de irrigação de superfície.



\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA -Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista)

### 3.2.4 Método de alocação das vazões unitárias

A partir dos diversos *outputs* de vazão unitária de projeto, há a necessidade de construir um método que seja capaz de representar os resultados em um único mapa, ou seja, que permita alocar o valor de vazão unitária de projeto em cada pixel, de modo a permitir a mensuração da demanda hídrica de cada microbacia do território brasileiro. Para isso, é preciso considerar o uso da terra atual (pastagem, agricultura, silvicultura,

urbano, etc.) e o tipo de agricultura desenvolvido (soja, milho, arroz etc.), para que então seja apontada, para cada microbacia, a solução por meio de intensificação ou expansão.

As áreas de **intensificação**, como já mencionadas anteriormente, são as em que atualmente se desenvolve a prática de agricultura de sequeiro, mas cuja produtividade pode aumentar se houver irrigação. Essas áreas serão usadas como referência para indicar os locais onde a irrigação tem maior potencial de surtir efeito via **intensificação**. As áreas de **expansão** são aquelas em que o uso atual é a pastagem. Estas serão utilizadas como referência para estimar o potencial de **expansão** das áreas agrícolas irrigadas, em substituição à pastagem.

Portanto, para a realização dessa operação, são necessários: (i) os mapas de vazão unitária de projeto; (ii) o mapa de uso da terra atual; e (iii) uma chave de decisão que converte este último em sua solução de agricultura irrigada (tipologia de irrigação).

O mapa de uso da terra, apresentado no capítulo 2, utilizado para esta operação divide o território em classes (agricultura, massas d'água, áreas não vegetadas, vegetação natural, pastagem e florestas plantadas). Vale destacar que na modelagem as áreas protegidas públicas e privadas (Unidades de Conservação de proteção integral, terras indígenas, APP e Reservas Legais - RL), bem como as áreas de vegetação passíveis de desmatamento legal foram retiradas do cômputo das áreas de expansão ou intensificação. No interior da classe "agricultura" há o delineamento de áreas de soja, cana-de-açúcar, arroz, pivôs centrais e áreas agrícolas não definidas.

A chave de decisão citada anteriormente tem como objetivo indicar um sistema de irrigação para cada uso da terra atual, a ser utilizado na estimativa da vazão unitária de projeto. Ou seja, de acordo com o uso atual, deve-se apontar qual seria o uso do solo com maior probabilidade de ser implantado ou mantido e o respectivo método de irrigação, pensando no cenário de intensificação ou expansão da irrigação para aquele local. Neste sentido, a **Quadro 5** sintetiza essa chave de decisão, de acordo com o uso atual da terra e na sequência é apresentado uma breve descrição para cada uma das soluções.



**Quadro 5.** Chave de decisão sobre métodos de irrigação para posterior alocação de vazão unitária de projeto.

USO DA TERRA ATUAL	ALOCÇÃO DA VAZÃO UNITÁRIA
<b>Cana-de-açúcar</b>	Cana-de-açúcar – Irrigação pressurizada
<b>Arroz</b>	Arroz – Irrigação por superfície
<b>Soja</b>	Milho - Irrigação pressurizada
<b>Pivô central</b>	Feijão - Irrigação pressurizada
<b>Agricultura indefinida</b>	Feijão - Irrigação pressurizada
<b>Pastagem</b>	Feijão - Irrigação pressurizada
<b>Outros usos</b>	Valor zero**

\*\*O valor zero indica os locais onde o uso da terra não pode ser convertido em agricultura irrigada, e dessa forma, essas áreas não entram no cálculo da demanda hídrica.

***Cana-de-açúcar - Cana-de-açúcar sob irrigação pressurizada***

A cultura de cana-de-açúcar tem uma dinâmica de produção conectada a plantas industriais, o que impõe o desafio logístico em se transportar grandes volumes de biomassa com alto teor de água, do campo até o centro de processamento. Essa característica do seu sistema agroindustrial restringe a viabilidade operacional a um curto raio útil desde as áreas de produção até as plantas industriais, o que favorece a monocultura, para máximo aproveitamento das áreas em produção. Além disso, a planta industrial gera volumes grandes de vinhaça cuja melhor forma de aproveitamento econômico e ambiental é o direcionamento para irrigação. Portanto, é altamente provável que sistemas de produção irrigados em áreas ocupadas com cana-de-açúcar estejam voltados para a intensificação dessa mesma cultura.

***Arroz - arroz sob irrigação por superfície***

A cultura de arroz tem a característica única, dentre as principais plantas cultivadas, de se desenvolver bem em ambientes de produção inundados. Os estabelecimentos dedicados a rizicultura tendem a investir na sistematização de terrenos para adequação ao sistema de inundação, em maquinário e manejo específicos, de modo a alcançar maior produtividade e competitividade comercial. Dessa maneira, uma vez instalada a cultura do arroz é improvável que ocorra rotação com outras culturas e que a opção pela intensificação ou expansão da cultura também seja voltada à replicação do sistema já implantado.

## Soja - Milho sob irrigação pressurizada

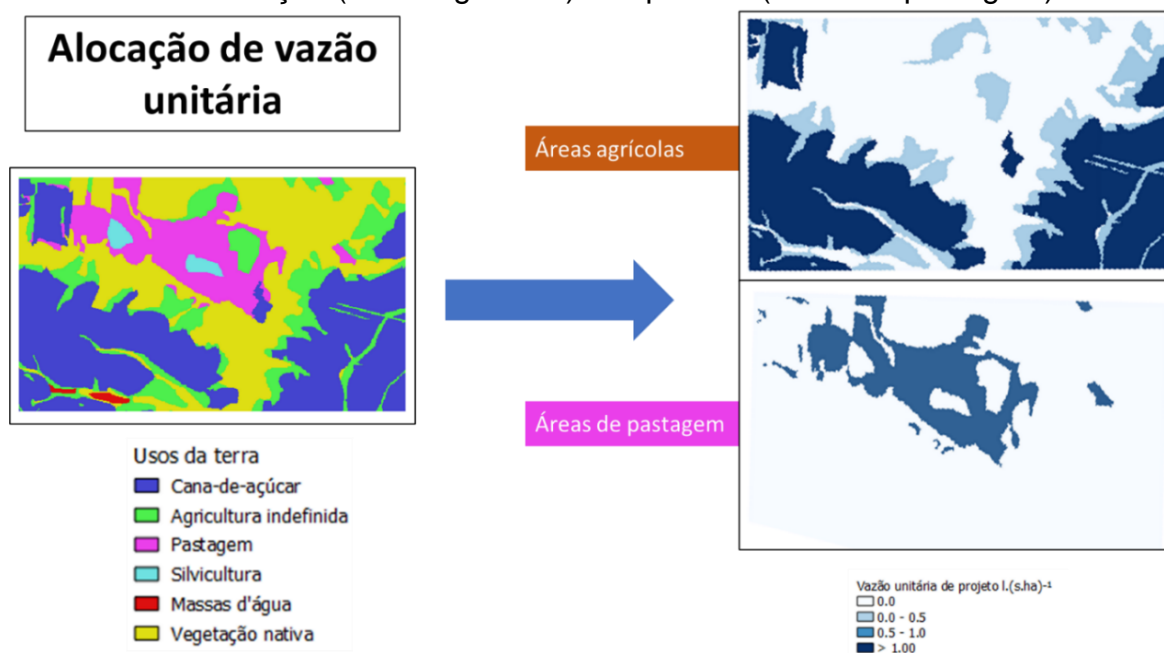
A sucessão de milho à soja, quer seja em segunda ou terceira safra, é hoje o sistema mais amplamente adotado no Brasil para buscar maior aproveitamento das áreas agrícolas. Segundo os dados da Produção Agrícola Municipal do IBGE, atualmente a maioria da produção de milho no Brasil ocorre desta forma, seja em segunda ou terceira safra. A combinação dessas duas culturas favorece o sistema de pivô central, não apenas do ponto de vista econômico, mas também do ponto de vista de manejo agrônômico do solo, pragas e doenças. Dessa maneira, é esperado que nas áreas de cultura de soja a principal estratégia para viabilização da irrigação seja através da opção pela intensificação (irrigação) da cultura de milho.

## Agricultura indefinida, pastagens e pivôs centrais - Feijão sob irrigação pressurizada

A cultura de feijão foi adotada como principal alternativa para intensificação de áreas de agricultura de sequeiro que não se encaixam nas situações anteriores, por ser uma cultura de ciclo curto e com alto potencial de ganhos econômicos. A produção de feijão é considerada estratégica na concepção e dimensionamento de novos projetos produtivos baseados na irrigação, frequentemente utilizada como a cultura “pagadora” do investimento.

Feitas essas considerações, o procedimento para alocação de vazão unitária sobre áreas de culturas agrícolas é ilustrado pela **Figura 38**. A figura apresenta um exemplo de recorte geográfico sobre o qual foi aplicada a regra acima descrita.

**Figura 38.** Procedimento de alocação de vazão unitária dividido em áreas de intensificação (áreas agrícolas) e expansão (áreas de pastagem)



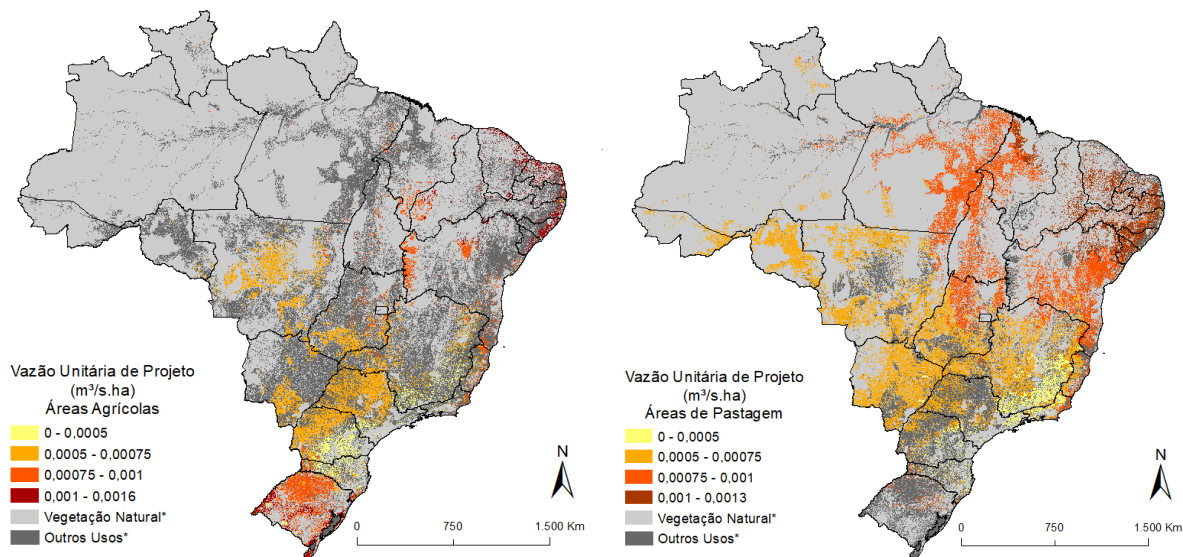
A imagem da esquerda ilustra para esse pequeno recorte os diversos usos descritos no mapa de uso da terra. A partir dessa informação, baseando-se na chave acima descrita, para cada *pixel*, aloca-se o valor de vazão unitária de projeto referente ao seu uso correspondente (cultura). No caso do exemplo acima, as áreas em rosa, que são ocupadas por pastagem, devem receber o valor referente ao mapa de vazão unitária de projeto do feijão com o método de irrigação pressurizada, representando áreas classificadas como de potencial para a “expansão” da agricultura irrigada. As áreas de cana-de-açúcar devem receber o valor de vazão unitária de projeto de cana-de-açúcar – irrigação pressurizada. Para as áreas de agricultura indefinida, os valores alocados serão os referentes à vazão unitária de projeto para feijão - irrigação pressurizada. Essas áreas são classificadas como de potencial para “intensificação” da agricultura irrigada. Já para as áreas de silvicultura, massas d’água e vegetação nativa, os valores de vazão unitária de projeto são zero, pois não é indicada a expansão ou intensificação da agricultura irrigada. Dessa forma, os mapas situados ao lado direito da **Figura 38** foram gerados distinguindo as duas propostas principais: **expansão** e **intensificação**. A figura que contém o mapa de vazão unitária de projeto sobre áreas agrícolas representa o mapa de vazão unitária para intensificação de agricultura. A figura que contém o mapa de vazão unitária de projeto sobre áreas de pastagem, representa o mapa de expansão da agricultura irrigada. Vale enfatizar que esta figura auxilia na visualização do método, porém esse método é aplicado à toda extensão do território brasileiro.

Para o cálculo da vazão unitária de projeto média foi feita a *média aritmética* nos *pixels* com vazão unitária diferente de zero, ou seja, os *pixels* disponíveis para **expansão** ou **intensificação** da agricultura irrigada, segundo a fórmula:

$$VZP_e = \frac{\sum_{i=1}^n VZPp_i}{n_e}$$

em que,  $VZP_e$  representa a vazão unitária média para o tipo de análise  $e$  em questão,  $n_e$  representa o número de *pixels* contabilizados, ou seja, disponíveis, seja para a **intensificação** ou **expansão** (depende da análise em questão),  $VZPp_i$  representa a vazão unitária de cada *pixel*  $i$  referente ao tipo de análise  $e$ . Os resultados de vazão média para cada microbacia estão representados pela **Figura 39**.

**Figura 39.** Distribuição espacial da vazão unitária de projeto média para cada microbacia sobre áreas passíveis de intensificação (áreas agrícolas) e de expansão (áreas de pastagem) ( $m^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ ).



\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista)

Vale lembrar, como mencionado no início deste tópico, que para definir a área a ser considerada para o primeiro processamento de demanda hídrica, utilizou-se a área de cada microbacia destinada aos diferentes usos da terra, ou seja, a área de pastagens e agricultura de sequeiro no interior de cada polígono.

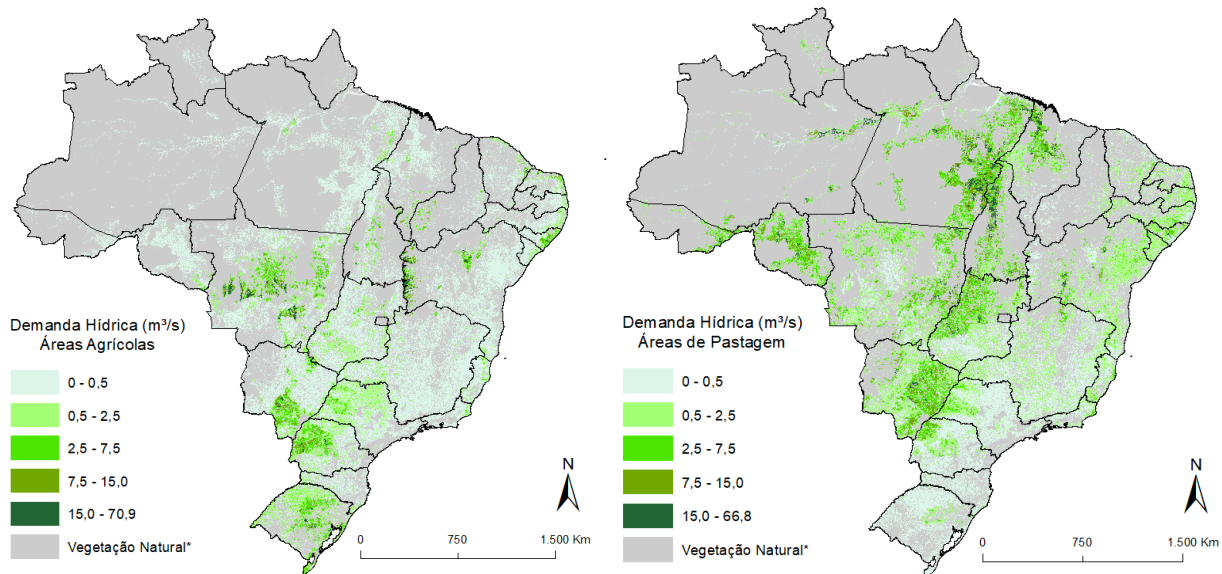
Por fim, foi realizada a última operação com o objetivo de agregar a vazão unitária por microbacia e apresentar o dado médio para cada polígono, possibilitando o cálculo da demanda hídrica total por microbacia. Para este cálculo foram necessárias duas informações: (i) a vazão unitária de projeto média para cada microbacia, dada em  $m^3 \cdot (s \cdot ha)^{-1}$  para cada tipo de análise representado por  $e$  (expansão ou intensificação); e (ii) a área utilizada para estimar a demanda total – sendo que para a análise de **intensificação** deve-se tomar a área de agricultura atual e para a análise de **expansão** a área de pastagem atual. O cálculo de demanda hídrica ( $Dem$ ) foi realizado pela seguinte fórmula:

$$Dem_e = VZP_e * A_e \quad (15)$$

Em que  $e$  representa o tipo de análise (**expansão** ou **intensificação**),  $Dem_e$  representa a demanda hídrica total estimada para a análise  $e$ ,  $VZP_e$  a vazão unitária de projeto média para a microbacia sob análise  $e$ , e  $A_e$  a área total para a análise<sup>23</sup>  $e$ .

Os resultados de demanda hídrica total para intensificação e expansão estão representados na **Figura 40**. Para algumas microbacias, observa-se uma geografia com sobreposição nos mapas a seguir, uma vez que numa mesma microbacia pode haver ambos os tipos de uso.

**Figura 40.** Distribuição espacial da demanda hídrica para intensificação e para expansão por microbacia



\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental e Reserva extrativista).

### 3.3 Disponibilidade hídrica superficial e cálculo da área adicional irrigável de intensificação e expansão

No âmbito da disponibilidade hídrica (Eixo 3), o principal resultado a ser alcançado diz respeito à quantidade de água remanescente disponível em cada microbacia, ou seja, representa, segundo a ANA, uma condição de oferta bruta de água (isenta de captações) sobre a qual será realizado o cômputo das diferentes demandas existentes, a fim de definir em qualquer tempo, o quanto de água ainda poderia ser alocado a outros usuários ou o quanto os recursos hídricos podem estar no seu limite de uso ou comprometidos.

<sup>23</sup> A área total para a análise representa a área dentro de cada microbacia destinada à agricultura ou pastagens. Com o objetivo de eliminar ruídos dos dados, foi aplicado o filtro de áreas mínima de 20 pixels por microbacia para compor área útil, ou seja, em microbacias em que a contagem foi igual ou menor que 20 pixels (representa 1.8 hectares) o valor foi tomado como zero.

Assim, a disponibilidade hídrica superficial é definida como uma vazão mínima de referência associada aos trechos de rio. Como dados de entrada deste estudo, a ANA forneceu a disponibilidade da vazão de referência com 95% de garantia ( $Q_{95}$ ) obtida de séries de vazões diárias observadas em estações fluviométricas ou séries de vazões modeladas em locais específicos.

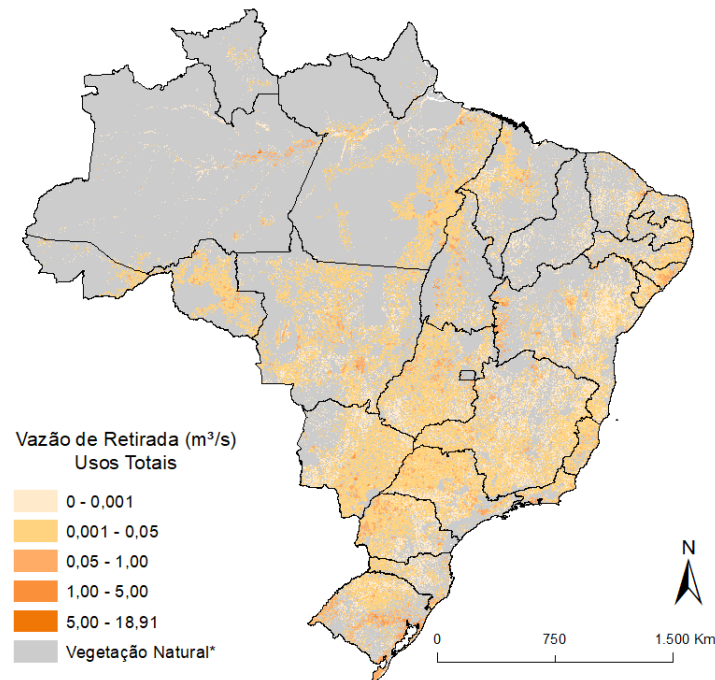
De forma sintética, para estimar a água remanescente disponível para irrigação, a disponibilidade bruta (dados fornecidos pela ANA) deve ser descontada dos usos consuntivos, que também são informações disponibilizadas pela agência. Os usos consuntivos da água para cada microbacia estão divididos em: uso humano urbano, uso humano rural, indústria de transformação, mineração, geração termoelétrica, dessedentação animal e agricultura irrigada, como visto no capítulo 2. Esses dados estão disponíveis para os anos de 2017, 2018, 2020 e existem projeções para os anos de 2025 e 2030.

Nesse sentido, a solução adotada para contemplar com segurança os usos consuntivos no modelo foi assumir como demanda hídrica total a soma de todos os usos consuntivos projetados para o ano de 2030, exceto irrigação, e para esta última, foi considerado o valor atual, segundo a fórmula a seguir:

$$UCT_s = D_{hu,2030,s} + D_{hr,2030,s} + D_{it,2030,s} + D_{m,2030,s} + D_{gt,2030,s} + D_{da,2030,s} + D_{ai,2020,s} \quad (16)$$

Em que,  $UCT$  representa a vazão de retirada total na microbacia  $s$ ;  $D_{hu,2030}$  representa a vazão de retirada para os usos humanos urbanos estimada para 2030 na microbacia  $s$ ;  $D_{hr,2030}$  a vazão de retirada para os usos humanos rurais estimada para 2030 na microbacia  $s$ ;  $D_{it,2030}$  a vazão de retirada para indústria de transformação estimada para 2030 na microbacia  $s$ ;  $D_{m,2030}$  a vazão de retirada para a mineração estimada para 2030 na microbacia  $s$ ;  $D_{gt,2030}$  a vazão de retirada para a geração termelétrica estimada para 2030 na microbacia  $s$ ;  $D_{da,2030}$  a vazão de retirada para dessedentação animal estimada para 2030 na microbacia  $s$ , e  $D_{ai,2020}$  a vazão de retirada para a irrigação atual. No capítulo 2 foi ilustrado a vazão de retirada de cada uso consuntivo e a **Figura 41** apresenta a distribuição espacial dos valores de vazão de retirada de todos os usos consuntivos compilados neste processamento.

**Figura 41.** Distribuição espacial dos valores de vazão de retirada de todos os usos consuntivos.



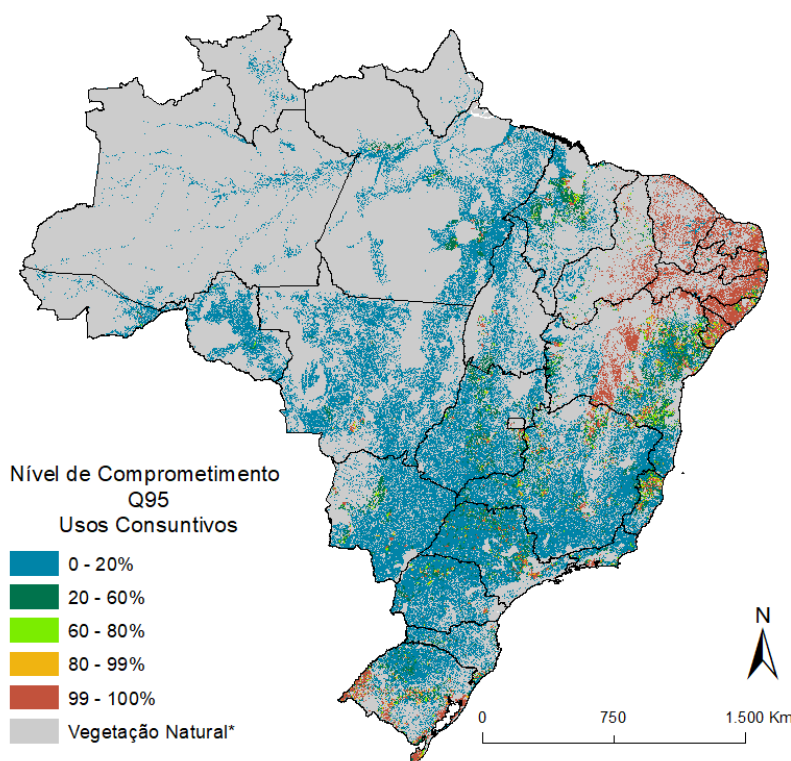
\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental e Reserva extrativista).

Uma vez definida a vazão de retirada para os usos consuntivos, é preciso calcular a vazão remanescente, após o desconto destes usos em relação à disponibilidade bruta. Para isso, com a contribuição da ANA, que disponibilizou uma ferramenta hidrológica para esse tipo de cálculo, foi possível realizar a simulação. Essa ferramenta é usada para cálculo de demanda hídrica acumulada e leva em consideração a rede de fluxos. Com sua aplicação, o *output* gerado é o nível de comprometimento ( $NC$ ) hídrico para cada microbacia do território. A partir do nível de comprometimento estima-se a disponibilidade hídrica remanescente através da fórmula a seguir.

$$Disp_{r,s} = Disp_{t,s} \cdot (100 - NC_s) \quad (17)$$

em que,  $s$  representa uma microbacia hipotética,  $Disp_{r,s}$  representa a disponibilidade remanescente,  $Disp_{t,s}$  a disponibilidade total e  $NC_s$  o nível de comprometimento da bacia hidrográfica. Caso o  $NC_s$  seja maior que 100%, significa que essa microbacia já está com um balanço hídrico negativo.

**Figura 42.** Distribuição espacial vazão remanescente por microbacias, conforme uso de dados da Q<sub>95</sub> versus usos consuntivos.



\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista)

### **3.3.1 Procedimentos para cálculo da área adicional irrigável com água superficial**

A área adicional irrigável com água superficial, por sua vez, é a última etapa dos processos apresentados neste tópico, e é obtida a partir da diferença entre a disponibilidade hídrica remanescente e demanda hídrica total para a microbacia, considerando a **intensificação** ou **expansão** da agricultura irrigada, já descritas anteriormente.

Nesse sentido, aplica-se a mesma lógica de desconto de demanda hídrica a partir da disponibilidade efetiva, já realizado no item anterior para estimar a disponibilidade hídrica remanescente. Nesse caso, diferentemente do passo anterior, a disponibilidade hídrica total de entrada no modelo será a disponibilidade remanescente, já descontada dos usos consuntivos. Para a demanda hídrica, o valor é obtido conforme a metodologia já descrita, para ambas as análises propostas (**expansão e intensificação**).



É importante ressaltar que a ferramenta disponibilizada pela ANA apresenta como *output* o nível de comprometimento dos recursos hídricos da microbacia após a simulação descrita acima, em que a demanda hídrica considerada foi composta pela área agrícola ou de pastagem da microbacia e pela vazão unitária de projeto média. Com isso, se configura o cenário de alta demanda hídrica, pois a área considerada é a máxima possível. Nesse caso, em diversas situações, o nível de comprometimento dos recursos hídricos é superior a 100%, ou seja, a disponibilidade hídrica total é excedida e, portanto, a área passível de ser irrigada é menor que a área usada para estimar tal demanda hídrica.

Para resgatar a área máxima passível de ser irrigada a partir dos níveis de comprometimento, é preciso fazer uma análise linear inversa dos resultados, de modo que, para estimar esta área na microbacia hipotética  $c$ , temos:

Se  $NC_c \geq 100\%$ :

$$\text{ÁreaMax}_c = \frac{100}{NC_c} \cdot A_c \quad (18)$$

Se  $NC_c < 100\%$ :

$$\text{ÁreaMax}_c = A_c \quad (19)$$

Em que *ÁreaMax* representa a área máxima passível de ser irrigada,  $A$  a área usada para estimar a demanda hídrica e  $NC$  o nível de comprometimento *output* da ferramenta. Para melhor ilustrar, supõe-se uma microbacia hipotética de área agrícola total de 100 hectares, vazão unitária média de  $1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$  e nível de comprometimento de 250%. Nesse caso, a área máxima passível de ser irrigada, deve ser calculada por:

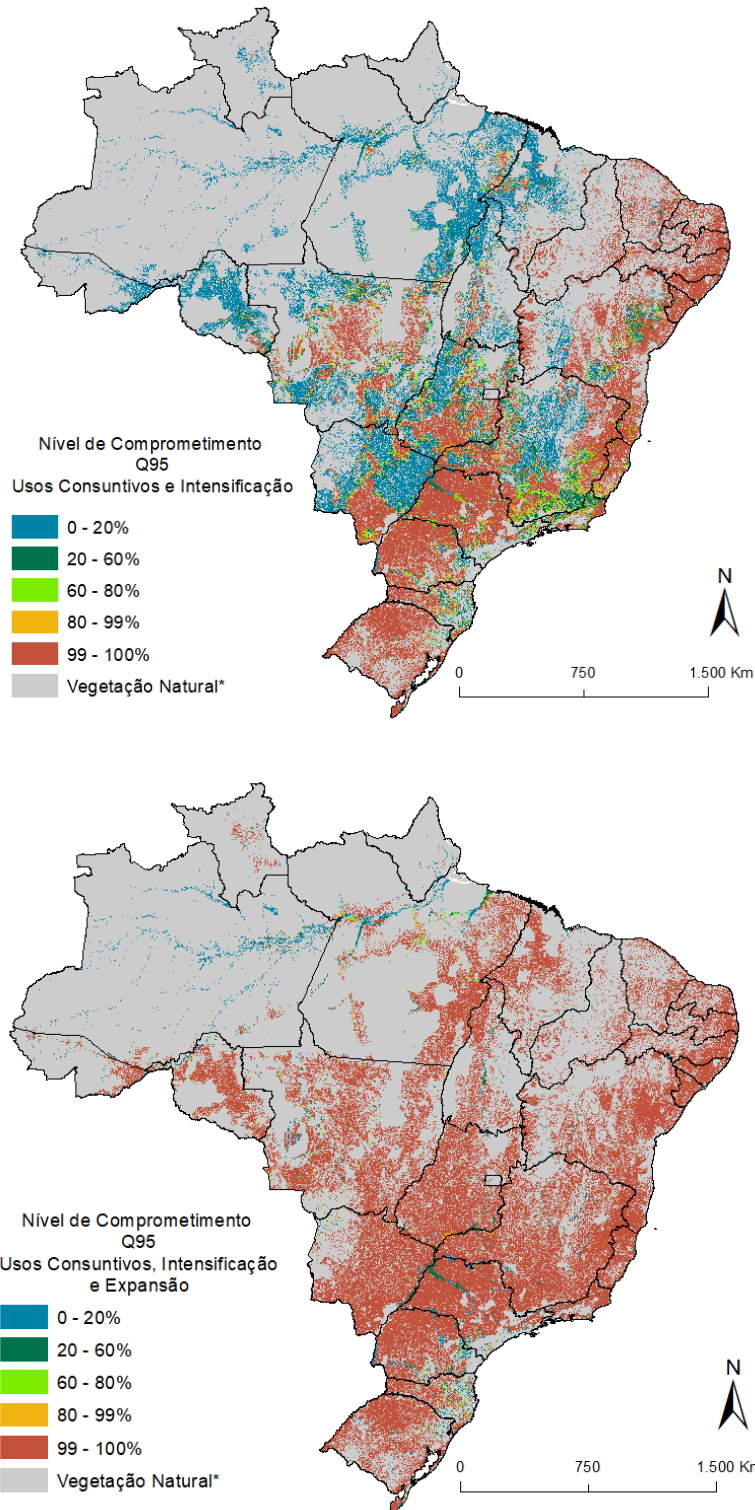
$$\text{ÁreaMax}_c = \frac{100}{250} \cdot 100 \quad (20)$$

e

$$\text{ÁreaMax}_c = 40 \text{ hectares}$$

Os resultados obtidos sobre o nível de comprometimento da Q95 considerando os descontos para intensificação; e os descontos obtidos para intensificação e expansão (juntos), obtidos consecutivamente na modelagem, podem ser vistos através da Erro! Fonte de referência não encontrada. **Figura 43.**

**Figura 43.** Distribuição espacial do nível de comprometimento da Q<sub>95</sub> considerados os descontos para intensificação e expansão, consecutivamente.



\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, áreas militares, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas e todas as unidades de conservação, exceto APA - Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista).

### **3.4. Disponibilidade hídrica subterrânea e área adicional irrigável**

Para concluir os cálculos da área adicional irrigável atual no Brasil, além da metodologia já descrita de estimativa a partir de recursos hídricos superficiais, há também uma segunda parcela que deve ser levada em consideração, a área adicional irrigável a partir de sistemas aquíferos subterrâneos. Apesar do potencial desse tipo de fonte hídrica ser menor, é importante que sejam computados no cálculo, de modo a evidenciar pontos específicos em que este recurso pode ser bem utilizado.

Para executar os cálculos, foi elaborado o refinamento dos dados de disponibilidade de água subterrânea fornecidos pela ANA e, a partir dessa informação em nível de microbacias, foi possível relacioná-la com o conjunto de estimativas de demanda hídrica apresentadas anteriormente, e por fim, aplicar a metodologia que será descrita na sequência para estimativa da área adicional irrigável por água subterrânea.

Vale ressaltar que, como premissa, adotou-se esse tipo de recurso hídrico como menos prioritário e, dessa forma, seguindo a sequência lógica de descontos para estimativa de área adicional irrigável com água superficial, descrita no item anterior, a água subterrânea e seu potencial entra como última prioridade, de modo que só pode ser proposta sobre as áreas agricultáveis remanescentes – subtraindo as áreas adicionais irrigáveis de intensificação e expansão do montante total de áreas agricultáveis - a partir das etapas anteriores. O cálculo das áreas remanescentes será explicado a seguir.

#### ***3.4.1 Procedimentos para cálculo da área adicional irrigável com água subterrânea***

O dado de vazão subterrânea (50% da RPE) por microbacia foi fornecido pela ANA. A reserva potencial explorável (RPE) equivale à parcela da reserva potencial direta (RPD) que pode ser explorada de forma sustentável, de modo a não interferir nas vazões superficiais mínimas referenciais para outorga. É estimada com base no coeficiente de sustentabilidade (CS), definido como o percentual máximo recomendado para se aplicar à RPD, de modo a evitar efeitos adversos nos aquíferos e redução significativa das vazões de base dos rios. Os dados consolidados para o presente estudo representam um mosaico de estudos hidrogeológicos desenvolvidos pela ANA e, em áreas sem estudos, a RPD foi estimada a partir das vazões específicas superficiais com garantia de 90% no tempo ( $Q_{90\%}$ ) e CS fixado em 25%.

Para as estimativas de área adicional irrigável, assumiu-se o limite de comprometimento de 50% da RPE, mantendo vazão disponível para outros usos. Adicionalmente, subtraiu-se da vazão subterrânea a vazão outorgada verificada no Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH/ANA), como segue:

$$VSD_i = VS_i - VO_i \quad (21)$$

$$VSi = RPE \times 0,5$$

Em que,  $VSD_i$  é a vazão disponível na microbacia  $i$ ;  $VSi$  é a vazão subterrânea e  $VO_i$  a vazão outorgada.

Uma vez realizados os cálculos de área adicional irrigável suportados pela disponibilidade hídrica superficial, com o apoio da metodologia disposta pela ANA, seguiu-se para a última etapa do processamento, de modo que sobre as áreas ainda disponíveis para intensificação e expansão estimou-se a área adicional irrigável com o uso de águas subterrâneas.

Para estimar a quantidade de área que o sistema aquífero de cada microbacia é capaz de suportar realizou-se a relação entre a vazão unitária de projeto média da microbacia ( $m^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ ) e a vazão subterrânea disponível ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), como segue:

$$AAIS_i = \frac{VZP_{ag,i}}{VSD_i} \quad (22)$$

onde  $AAIS_i$  representa a área adicional irrigável com uso de água subterrânea para uma microbacia hipotética  $i$ ;  $VZP_{ag,i}$  representa a vazão unitária de projeto média para as áreas agrícolas da microbacia em questão; e, por fim,  $VSD_i$  é a vazão subterrânea disponível.

Análise dimensional:

$$ha = \frac{\frac{m^3}{\frac{ha \cdot s}{m^3}}}{s} \quad (23)$$

Durante os procedimentos existe a possibilidade de que, em uma microbacia hipotética, a proporção da equação acima resulte em uma área superior à área disponível na microbacia. Nesse caso, a seguinte condicional foi aplicada:

Se  $AAIS_i \geq ARem_i$ , então:

$$AAIS_i = ARem_i \quad (24)$$

Se  $AAIS_i < ARem_i$ , então:

$$AAIS_i = \frac{VZP_{ag}}{VSD_i} \quad (25)$$

em que,  $ARem_i$  representa a área ainda disponível para ser proposta como passível de conversão para agricultura irrigada na microbacia.

Assim, para o cálculo da área disponível na microbacia realizou-se o seguinte cálculo:

$$ARem_i = (AA_{ag,i} + AA_{pas,i}) - (AAI_{intensificação,i} + AAI_{expansão,i} + AI_i)$$

onde  $AA_{ag,i}$  é a área agricultável atualmente com agricultura;  $AA_{pas,i}$  a área agricultável atualmente com pastagem;  $AAI_{intensificação,i}$  área adicional irrigável de intensificação;  $AAI_{expansão,i}$  área adicional irrigável de expansão e  $AI_i$  a área irrigada atual.

Em suma, a partir dos resultados provenientes dos processamentos consecutivos dos eixos (1) área irrigável, (2) demanda hídrica e (3) disponibilidade hídrica foi calculada a área adicional irrigável para o território brasileiro considerando, primeiramente, a disponibilidade de água superficial e em seguida de água subterrânea. Os resultados são apresentados no capítulo a seguir.

#### 4. POTENCIAL DE ADOÇÃO DA AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

As áreas potenciais para adoção da agricultura irrigada para o território brasileiro são apresentadas e discutidas neste capítulo. Como enfatizado ao longo deste documento, as áreas denominadas como adicionais irrigáveis são aquelas com disponibilidade hídrica para adoção da irrigação e que, por sua vez, ainda não são irrigadas atualmente. De maneira inédita, este estudo também diferencia as áreas adicionais irrigáveis com potencial de **intensificação de agricultura de sequeiro** por meio da irrigação e as áreas adicionais irrigáveis com potencial de **expansão da agricultura irrigada sobre pastagens consolidadas**.

Primeiramente, para apresentação dos resultados de área adicional de intensificação e expansão, vale ressaltar que uma das premissas adotadas nesse estudo foi que a implementação sistemas de irrigação deve se dar preferencialmente em áreas onde existe hoje a prática de atividades agrícolas e, em segundo plano de prioridade, em áreas de pastagem, nas quais seria necessária a conversão da matriz produtiva.

Uma segunda importante premissa adota foi considerar os recursos hídricos subterrâneos como menos prioritário em relação a água superficial, de modo que o seu potencial para uso na irrigação é proposta somente sobre as áreas agricultáveis remanescentes – subtraindo as áreas adicionais irrigáveis de intensificação e expansão do montante total de áreas agricultáveis.

Além disso, não foram consideradas neste estudo as áreas de vegetação nativa legalmente passíveis de serem desflorestadas, o que demandaria esforços no sentido de limpeza das áreas e implementação de um novo sistema produtivo, além dos aspectos relacionados a sustentabilidade ambiental.

##### 4.1 Resultados da Área adicional Irrigável – água superficial

Os resultados relacionados à área adicional irrigável de intensificação e expansão são apresentados na **Tabela 4**. Na tabela é possível verificar os resultados de área adicional irrigável também por estado e grande região, tanto em área (hectares) quanto em percentual (%) – sendo que o percentual das grandes regiões é calculado em relação ao total Brasil e o percentual dos estados em relação à região a qual pertence.

**Tabela 8.** Valores, em hectares, da área adicional irrigável de intensificação e expansão no Brasil

	AAI intensificação		AAI expansão		AAI total (Superficial)	
	hectares	%	hectares	%	hectares	%
<b>CENTRO-OESTE</b>	<b>8.929.098</b>	<b>33,4</b>	<b>9.824.196</b>	<b>36,8</b>	<b>18.753.294</b>	<b>35,1</b>
DISTRITO FEDERAL	30.182	0,3	19.459	0,2	49.642	0,3
GOIÁS	1.987.706	22,3	2.396.858	24,4	4.384.564	23,4
MATO GROSSO	5.241.426	58,7	4.540.914	46,2	9.782.340	52,2
MATO GROSSO DO SUL	1.669.784	18,7	2.866.965	29,2	4.536.749	24,2
<b>NORDESTE</b>	<b>1.112.048</b>	<b>4,2</b>	<b>2.103.595</b>	<b>8</b>	<b>3.215.642</b>	<b>6,0</b>
ALAGOAS	22.464	2,0	21.078	1,0	43.542	1,4
BAHIA	632.807	56,9	878.644	41,8	1.511.452	47,0
CEARÁ	77.647	7,0	91.981	4,4	169.628	5,3
MARANHÃO	196.728	17,7	944.334	44,9	1.141.062	35,5
PARAÍBA	12.878	1,2	23.194	1,1	36.072	1,1
PERNAMBUCO	31.546	2,8	63.448	3,0	94.993	3,0
PIAUI	97.215	8,7	51.950	2,5	149.165	4,6
RIO GRANDE DO NORTE	31.585	2,8	12.979	0,6	44.565	1,4
SERGIPE	9.176	0,8	15.987	0,8	25.163	0,8
<b>NORTE</b>	<b>797.008</b>	<b>3,0</b>	<b>10.142.443</b>	<b>38</b>	<b>10.939.451</b>	<b>20,5</b>
ACRE	0	0,0	691.268	6,8	691.268	6,3
AMAPÁ	25.878	3,2	69.702	0,7	95.580	0,9
AMAZONAS	6.888	0,9	1.419.720	14,0	1.426.608	13,0
PARÁ	230.040	28,9	4.266.673	42,1	4.496.713	41,1
RONDÔNIA	158.572	19,9	2.239.966	22,1	2.398.538	21,9
RORAIMA	14.148	1,8	207.439	2,0	221.587	2,0

	AAI intensificação		AAI expansão		AAI total (Superficial)	
	hectares	%	hectares	%	hectares	%
TOCANTINS	361.482	45,4	1.247.675	12,3	1.609.157	14,7
<b>SUDESTE</b>	<b>8.150.081</b>	<b>30,5</b>	<b>4.115.525</b>	<b>15</b>	<b>12.265.606</b>	<b>23,0</b>
ESPÍRITO SANTO	328.636	4,0	39.648	1,0	368.284	3,0
MINAS GERAIS	3.406.952	41,8	3.241.218	78,8	6.648.170	54,2
RIO DE JANEIRO	326.045	4,0	264.836	6,4	590.881	4,8
SÃO PAULO	4.088.447	50,2	569.824	13,8	4.658.271	38,0
<b>SUL</b>	<b>7.706.132</b>	<b>28,9</b>	<b>540.271</b>	<b>2</b>	<b>8.246.403</b>	<b>15,4</b>
PARANÁ	3.587.194	46,5	275.333	51,0	3.862.527	46,8
RIO GRANDE DO SUL	2.904.006	37,7	41.958	7,8	2.945.964	35,7
SANTA CATARINA	1.214.932	15,8	222.980	41,3	1.437.913	17,4
<b>Total Geral</b>	<b>26.694.367</b>	<b>100,0</b>	<b>26.726.030</b>	<b>100</b>	<b>53.420.396</b>	<b>100,0</b>

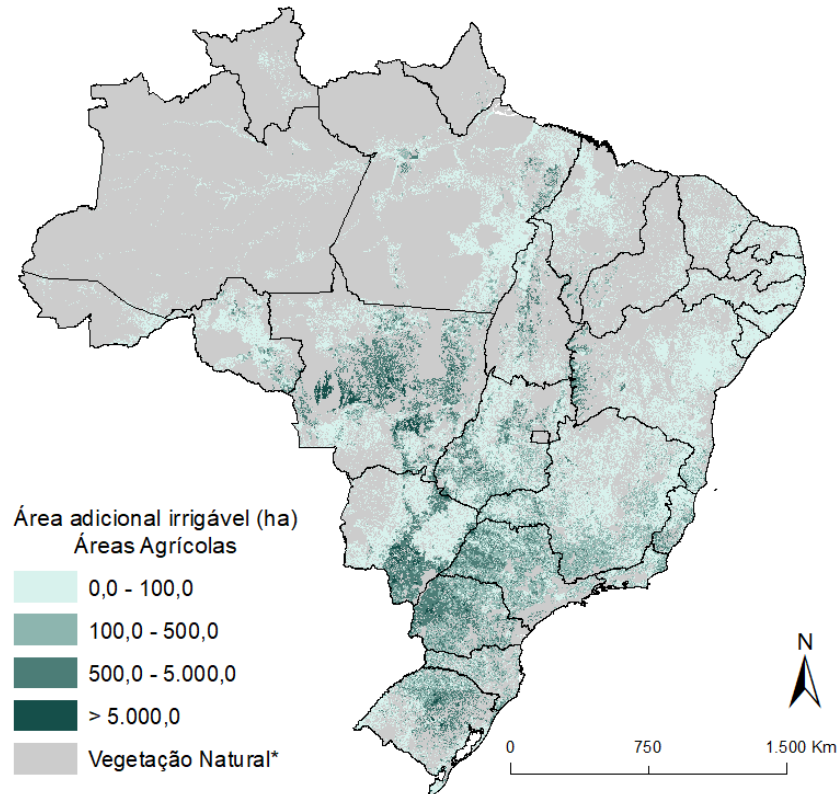
Observa-se pelos resultados que a área adicional irrigável com água superficial no Brasil soma um total de 53,4Mha dos quais 26,69Mha (49,97%) se encontram em áreas de intensificação – ou seja consolidadas com agricultura de sequeiro e que podem ser intensificadas por meio da irrigação; e 26,72Mha (50,03%) situam-se em áreas de expansão – ou seja, consolidadas com pastagem e que podem ser convertidas para agricultura irrigada.

De modo geral, com base na água superficial, a região centro-oeste apresenta a maior quantidade de áreas adicionais irrigáveis no Brasil, com mais de 18,7Mha, o que representa mais de 35% de toda área adicional irrigável no país. Desse total, 8,93Mha são áreas adicionais irrigáveis de intensificação e 9,8Mha de expansão. A segunda região com maior área adicional irrigável é a sudeste, com cerca de 12,3Mha (23% do Brasil), dos quais 8,1Mha são áreas adicionais de intensificação e 4,1 Mha de expansão. Na sequência está a região norte com aproximadamente 11Mha de área adicional irrigável, onde pouco menos de 0,8Mha estão destinados a área adicional irrigável de intensificação, enquanto mais de 10Mha são de expansão. A seguir vem a região sul, com cerca de 8,2Mha de área adicional irrigável, distribuídos entre intensificação (7,7Mha) e expansão (540 mil hectares). Por fim, a região com menor área adicional irrigável no Brasil é a nordeste, com aproximadamente 3,3Mha, sendo que pouco mais de 1Mha de hectares são áreas adicionais de intensificação e 2,1Mha de expansão.

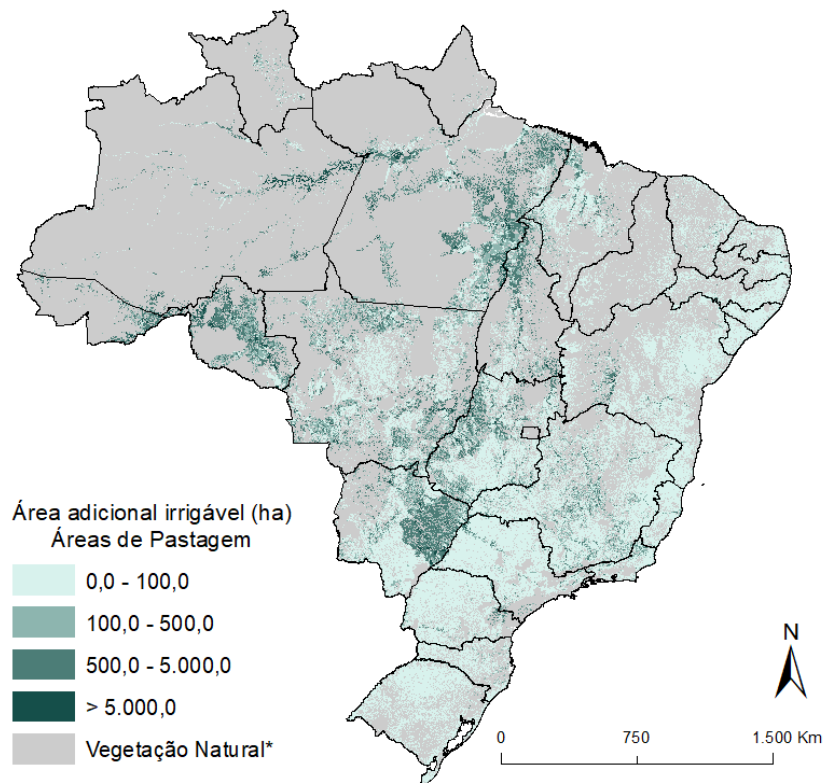


Uma representação espacial dos resultados de área adicional irrigável de intensificação, de expansão e o total são apresentados pelas **Figuras 44, 45 e 46**.

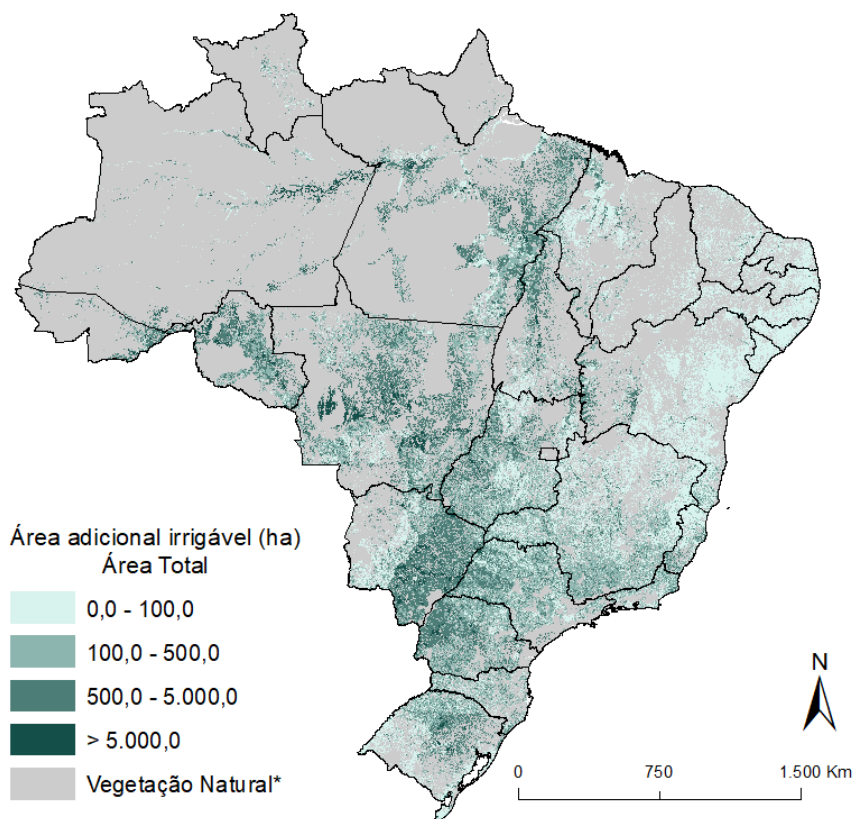
**Figura 44.** Distribuição espacial da área adicional irrigável de intensificação



**Figura 45.** Distribuição espacial da área adicional irrigável de expansão



**Figura 46.** Distribuição espacial da área adicional irrigável total, com base na água superficial



#### 4.2 Resultados da Área adicional Irrigável – água subterrânea

Os resultados relacionados a área adicional irrigável obtidas com uso da água subterrânea são apresentados na **Tabela 9** e **Figura 47**. Na tabela é possível verificar os resultados de área adicional irrigável também por estado e grande região, tanto em área (hectares) quanto em percentual (%) – sendo que o percentual das grandes regiões é calculado em relação ao total Brasil e o percentual dos estados em relação a qual pertence.

Os resultados apontam que o Brasil apresenta cerca de 2,4Mha de área adicional irrigável com base na água subterrânea disponível. Neste cenário, a região Centro-Oeste mais uma vez concentra a maior quantidade de área adicional irrigável, com aproximadamente 954 mil hectares - o que representa mais de 39% de toda área irrigável com água subterrânea no país. A segunda região com maior área adicional irrigável é a sudeste com cerca de 672 mil hectares (27,6% do Brasil). Na sequência está a região sul com uma área adicional irrigável próxima a 352 mil hectares, representando 14,5% da área brasileira. Em seguida vem a região norte, com cerca de 347 mil hectares de área adicional irrigável, ou seja, cerca de 14,3% da área irrigável do Brasil. Por fim, a

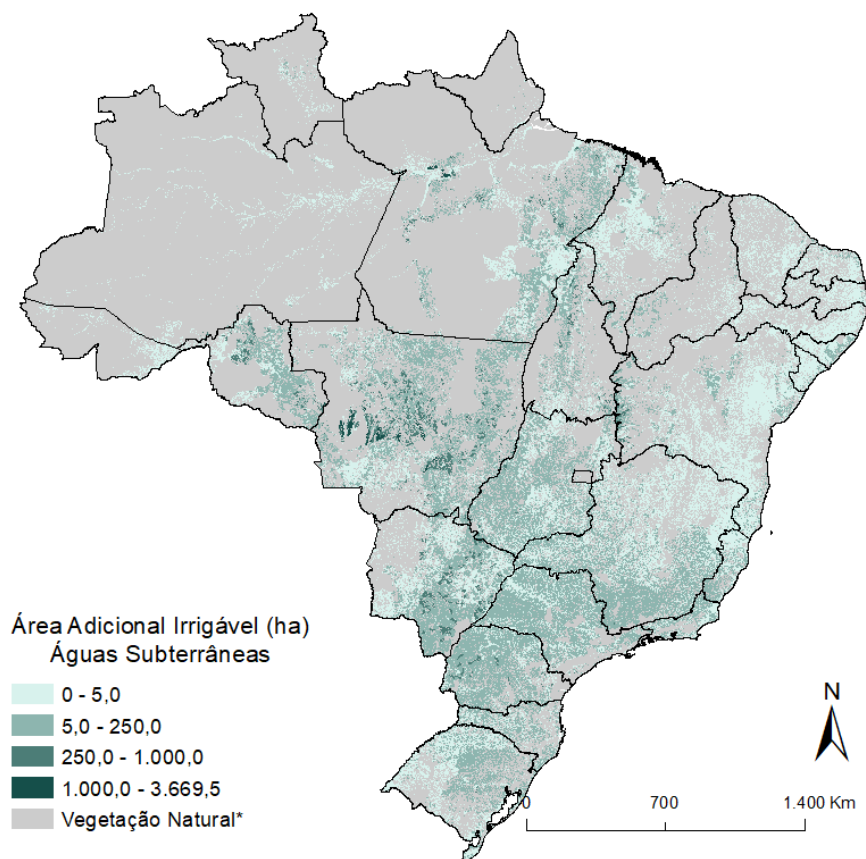
região com menor área adicional irrigável no Brasil é a nordeste com aproximadamente 105 mil hectares, expressando pouco mais de 4% da área adicional irrigável do país utilizando água subterrânea.

Uma representação espacial dos resultados de área adicional irrigável obtidos pela modelagem considerando a água subterrânea disponível é apresentado pela **Figura 47**.

**Tabela 9.** Valores, em hectares, da área adicional irrigável com base na água subterrânea disponível

	<b>Área adicional irrigável (AAI) (Subterrânea)</b>	
	<b>hectares</b>	<b>%</b>
<b>CENTRO-OESTE</b>	<b>953.627</b>	<b>39,2</b>
DISTRITO FEDERAL	3.004	0,3
GOIÁS	182.676	19,2
MATO GROSSO	579.359	60,8
MATO GROSSO DO SUL	188.588	19,8
<b>NORDESTE</b>	<b>104.888</b>	<b>4,3</b>
ALAGOAS	2.387	2,3
BAHIA	48.618	46,4
CEARÁ	1.345	1,3
MARANHÃO	22.560	21,5
PARAÍBA	297	0,3
PERNAMBUCO	334	0,3
PIAUI	26.948	25,7
RIO GRANDE DO NORTE	1.941	1,9
SERGIPE	459	0,4
<b>NORTE</b>	<b>347.321</b>	<b>14,3</b>
ACRE	-	-
AMAPÁ	3.776	1,1
AMAZONAS	7.080	2,0
PARÁ	181.186	52,2
RONDÔNIA	98.818	28,5
RORAIMA	2.265	0,7
TOCANTINS	54.197	15,6
<b>SUDESTE</b>	<b>672.015</b>	<b>27,6</b>
ESPÍRITO SANTO	20.234	3,0
MINAS GERAIS	385.174	57,3
RIO DE JANEIRO	27.372	4,1
SÃO PAULO	239.236	35,6
<b>SUL</b>	<b>352.977</b>	<b>14,5</b>
PARANÁ	219.260	62,1
RIO GRANDE DO SUL	64.957	18,4
SANTA CATARINA	68.760	19,5
<b>Total Geral</b>	<b>2.430.829</b>	<b>100</b>

**Figura 47.** Distribuição espacial da área adicional irrigável com água subterrânea



*\*Áreas de vegetação natural, de formação natural não florestal, Unidade de Conservação - UCs (terras indígenas, quilombolas, áreas militares e todas as unidades de conservação, exceto APA -Áreas de Proteção Ambiental- e Reserva extrativista)*

A modelagem de água subterrânea tem incertezas indissociáveis da natureza do recurso. Informações precisas de disponibilidade hídrica subterrânea são indisponíveis na abrangência territorial da modelagem aqui conduzida e, portanto, os resultados obtidos devem ser considerados como uma moldura útil para discussão geral. Isso posto, ressalta-se em termos agregados e regionais, que uma vez esgotada a capacidade de suporte de irrigação pela água superficial, restaria uma reserva técnica modesta para aumentar a área irrigada com água subterrânea. Em nenhuma grande região Brasileira a reserva subterrânea suportaria mais de 1Mha de agricultura irrigada, restringindo-se a apenas 100 mil hectares no Nordeste. Os recursos subterrâneos não podem ser considerados, portanto, um lastro garantidor do desenvolvimento agrícola no médio e longo prazos.

### 4.3 Área Adicional Irrigável e Área irrigável

Os resultados relacionados a área adicional irrigável total e área irrigável total para o território brasileiro são apresentados neste item. A área adicional irrigável (AAI) total é obtida por meio da soma da área adicional irrigável de água superficial e de água subterrânea, apresentados nos itens anteriores. Enquanto que a área irrigável total no Brasil advém da soma entre a área adicional irrigável total e a área atual de agricultura irrigada, segundo os dados da ANA (2020). Os resultados para as grandes regiões e para os estados brasileiros são sintetizados pela **Tabela 10**.

Nota-se pelos resultados que o Brasil apresenta potencial para adotar agricultura irrigada em aproximadamente 55,8Mha, com base na soma dos resultados obtidos de AAI de água superficial e subterrânea. Deste total, a região centro-oeste apresenta a maior parcela de áreas (19,7Mha); seguido da região sudeste (12,9Mha), região norte (11,3Mha), região sul (8,6Mha) e, por fim, região nordeste com a menor parcela (3,3Mha).

Além disso, a partir da área irrigada atual e da área adicional irrigável total, observa-se que o território brasileiro possui mais de 61Mha de área irrigável, considerando os 55,8Mha de área adicional irrigável e 5,6Mha de área atualmente irrigadas. A região centro-oeste apresenta a maior quantidade de área irrigável no Brasil, com mais de 20,5Mha o que representa mais de 33% de toda área irrigável no país. A segunda região com maior área irrigável é a sudeste com pouco mais de 14,7Mha (24% do Brasil). Na sequência está a região norte com mais de 11,5Mha de área irrigável, representando quase 19% da área irrigável brasileira. Seguido da região sul com cerca de 10Mha, ou seja, cerca de 16% da área irrigável do Brasil. Por fim, a região com menor área irrigável no Brasil é a nordeste com aproximadamente 4,6Mha, expressando 7,5% da área irrigável do país.

Uma representação espacial dos resultados de área adicional irrigável total e área irrigável total é apresentada pela **Figura 48** e **Figura 49**, respectivamente.

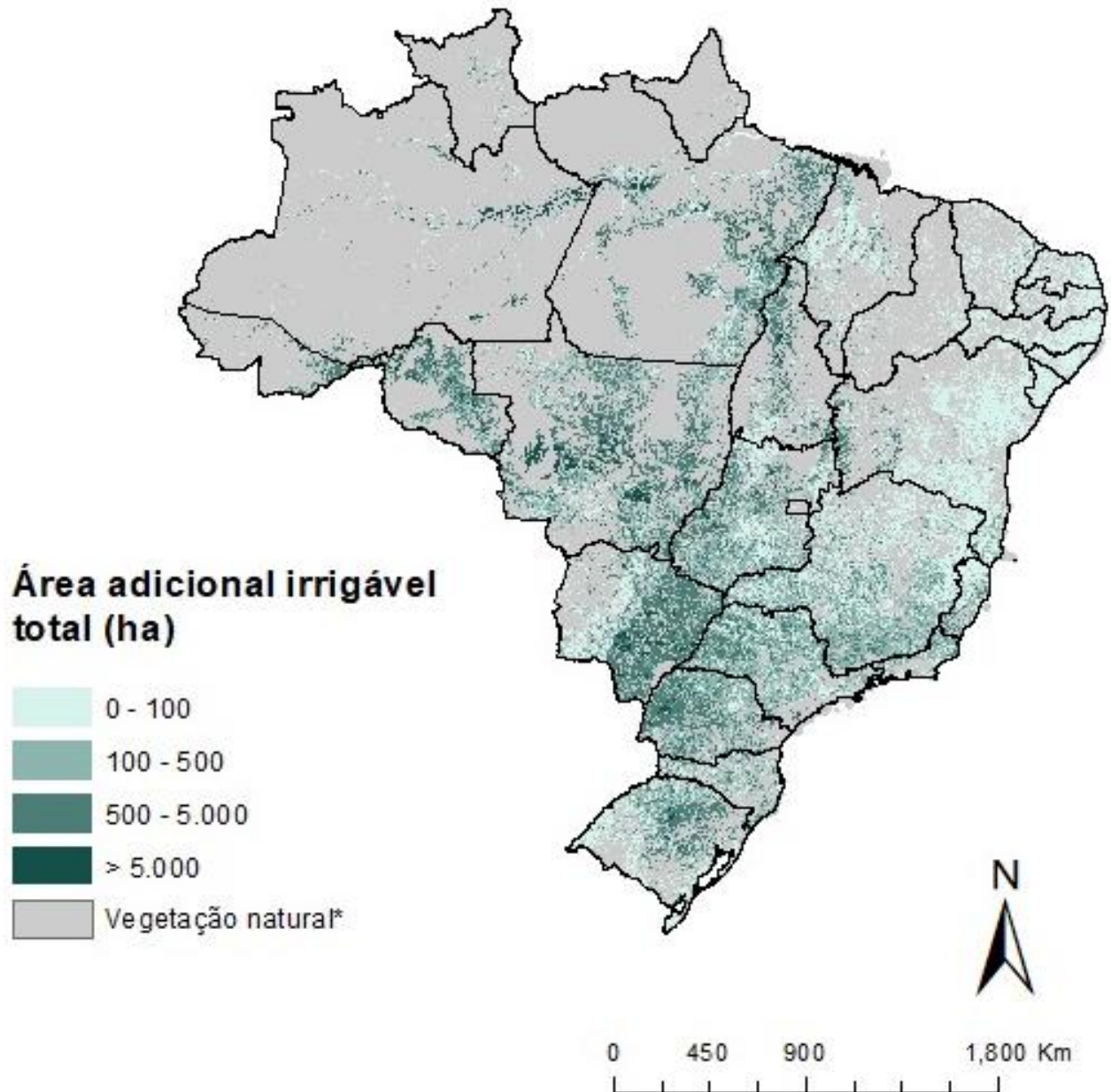
**Tabela 10.** Valores, em hectares, da área adicional irrigável (AAI), área irrigada e área irrigável no Brasil

	AAI Superficial	AAI Subterrânea	AAI Total		Área irrigada		Área irrigável	
	hectares	hectares	hectares	%	hectares	%	hectares	%
<b>CENTRO-OESTE</b>	<b>18.753.294</b>	<b>953.627</b>	<b>19.706.921</b>	<b>35,3%</b>	<b>878.169</b>	<b>15,6%</b>	<b>20.585.091</b>	<b>33,5%</b>
DISTRITO FEDERAL	49.642	3.004	52.646	0,3%	22.059	2,5%	74.705	0,4%
GOIÁS	4.384.564	182.676	4.567.239	23,2%	511.676	58,3%	5.078.916	24,7%
MATO GROSSO	9.782.340	579.359	10.361.699	52,6%	253.298	28,8%	10.614.997	51,6%
MATO GROSSO DO SUL	4.536.749	188.588	4.725.337	24,0%	91.136	10,4%	4.816.474	23,4%
<b>NORDESTE</b>	<b>3.215.642</b>	<b>104.888</b>	<b>3.320.531</b>	<b>5,9%</b>	<b>1.268.870</b>	<b>22,5%</b>	<b>4.589.401</b>	<b>7,5%</b>
ALAGOAS	43.542	2.387	45.929	1,4%	192.074	15,1%	238.003	5,2%
BAHIA	1.511.452	48.618	1.560.069	47,0%	525.439	41,4%	2.085.508	45,4%
CEARÁ	169.628	1.345	170.974	5,1%	60.529	4,8%	231.503	5,0%
MARANHÃO	1.141.062	22.560	1.163.622	35,0%	89.174	7,0%	1.252.796	27,3%
PARAÍBA	36.072	297	36.369	1,1%	84.604	6,7%	120.973	2,6%
PERNAMBUCO	94.993	334	95.327	2,9%	169.068	13,3%	264.394	5,8%
PIAUÍ	149.165	26.948	176.113	5,3%	47.304	3,7%	223.417	4,9%
RIO GRANDE DO NORTE	44.565	1.941	46.505	1,4%	52.488	4,1%	98.994	2,2%
SERGIPE	25.163	459	25.622	0,8%	48.191	3,8%	73.813	1,6%
<b>NORTE</b>	<b>10.939.451</b>	<b>347.321</b>	<b>11.286.772</b>	<b>20,2%</b>	<b>227.539</b>	<b>4,0%</b>	<b>11.514.311</b>	<b>18,7%</b>
ACRE	691.268	-	691.268	6,1%	1.367	0,6%	692.635	6,0%
AMAPÁ	95.580	3.776	99.355	0,9%	2.103	0,9%	101.459	0,9%
AMAZONAS	1.426.608	7.080	1.433.687	12,7%	5.100	2,2%	1.438.788	12,5%
PARÁ	4.496.713	181.186	4.677.899	41,4%	24.001	10,5%	4.701.901	40,8%
RONDÔNIA	2.398.538	98.818	2.497.356	22,1%	15.957	7,0%	2.513.313	21,8%
RORAIMA	221.587	2.265	223.852	2,0%	3.831	1,7%	227.684	2,0%

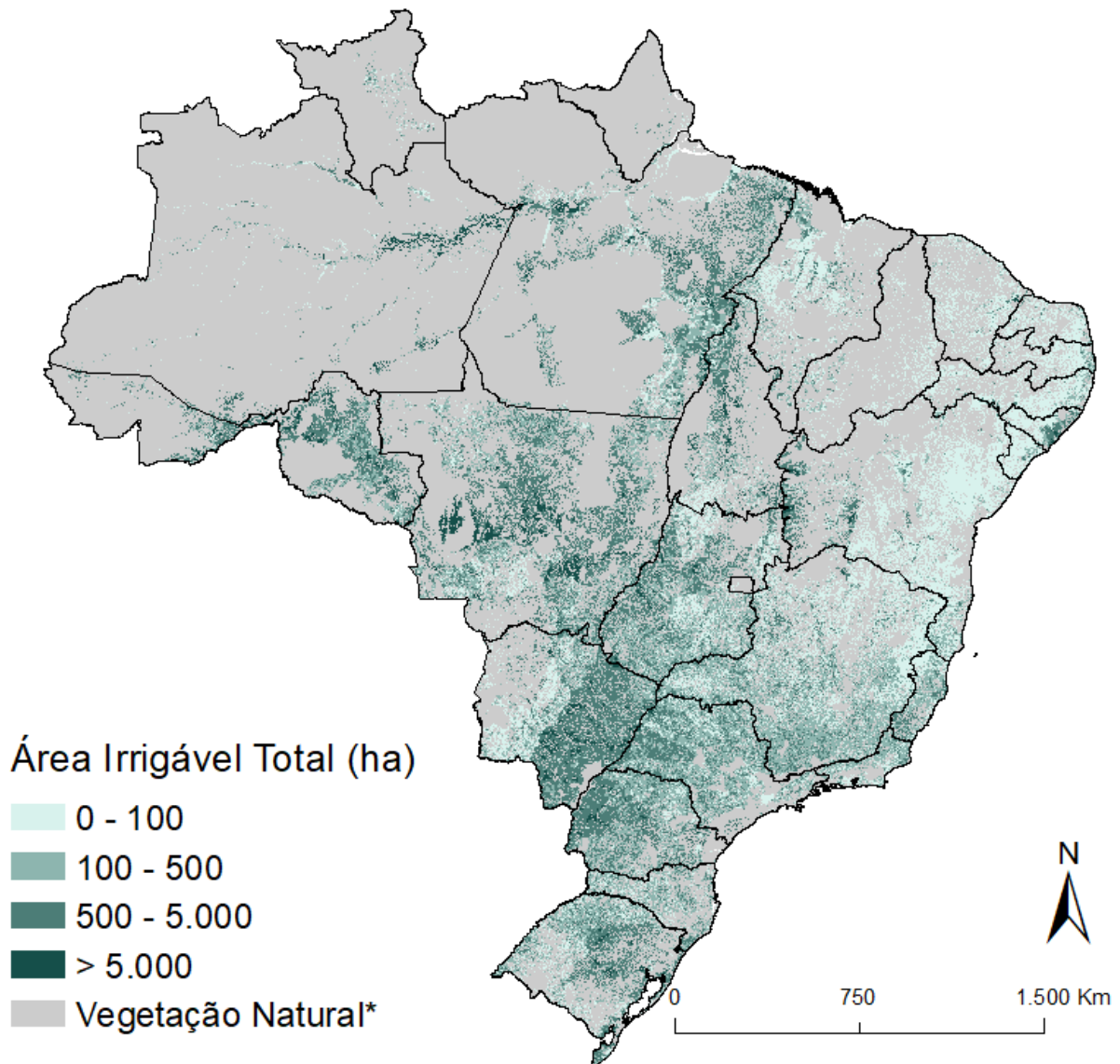


	AAI Superficial	AAI Subterrânea	AAI Total		Area irrigada		Área irrigável	
	<i>hectares</i>	<i>hectares</i>	<i>hectares</i>	%	<i>hectares</i>	%	<i>hectares</i>	%
TOCANTINS	1.609.157	54.197	1.663.354	14,7%	175.179	77,0%	1.838.533	16,0%
<b>SUDESTE</b>	<b>12.265.606</b>	<b>672.015</b>	<b>12.937.621</b>	<b>23,2%</b>	<b>1.813.296</b>	<b>32,1%</b>	<b>14.750.918</b>	<b>24,0%</b>
ESPÍRITO SANTO	368.284	20.234	388.518	3,0%	248.713	13,7%	637.231	4,3%
MINAS GERAIS	6.648.170	385.174	7.033.344	54,4%	961.455	53,0%	7.994.799	54,2%
RIO DE JANEIRO	590.881	27.372	618.253	4,8%	52.665	2,9%	670.918	4,5%
SÃO PAULO	4.658.271	239.236	4.897.507	37,9%	550.463	30,4%	5.447.970	36,9%
<b>SUL</b>	<b>8.246.403</b>	<b>352.977</b>	<b>8.599.380</b>	<b>15,4%</b>	<b>1.457.578</b>	<b>25,8%</b>	<b>10.056.958</b>	<b>16,4%</b>
PARANÁ	3.862.527	219.260	4.081.787	47,5%	97.238	6,7%	4.179.025	41,6%
RIO GRANDE DO SUL	2.945.964	64.957	3.010.921	35,0%	1.163.251	79,8%	4.174.172	41,5%
SANTA CATARINA	1.437.913	68.760	1.506.673	17,5%	197.089	13,5%	1.703.762	16,9%
<b>Total Geral</b>	<b>53.420.396</b>	<b>2.430.829</b>	<b>55.851.225</b>	<b>100%</b>	<b>5.645.452</b>	<b>100,0%</b>	<b>61.496.679</b>	<b>100%</b>

**Figura 48.** Distribuição espacial da área adicional irrigável total com base na água superficial e subterrânea.



**Figura 49.** Distribuição espacial da área irrigável total com base na área adicional irrigável total e área irrigada atual.



Os pressupostos adotados pelo modelo priorizam a alocação de recursos hídricos primeiro em áreas já consolidadas de agricultura e só depois na expansão sobre pastagens. Isso aproxima os resultados das dinâmicas reais de uso da terra e da forma de tomada de decisão dos agentes econômicos, configurando uma geografia de resultados aderente a realidade com mais de 90% do potencial de intensificação alocados no centro-sul enquanto quase 40% do potencial de expansão está ainda na Região Norte.

O estudo estima um potencial físico de quase decuplicar a área de agricultura irrigada no país contando apenas com água superficial. Diante disso há dois pontos que valem ser ressaltados. Em primeiro lugar, o componente físico é apenas um dos vários fatores que efetivamente indicam onde é possível chegar e quanto é possível

desenvolver. A consolidação de agricultura irrigada depende também de variáveis de infraestrutura, disponibilidade de recursos econômicos, pessoal qualificado, equipamentos, mercado, governança fundiária, segurança, outorga de uso da água, gestão e monitoramento. Esses fatores serão incluídos na análise subsequente de modo a aproximar o potencial do exequível e, com isso, possibilitar contribuir para um planejamento consequente. Em segundo lugar, o potencial estimado apesar de aparentemente alto, corresponde a apenas 6% do território nacional, incorrendo em risco de comprometimento hídrico para outros usos caso se extrapole esses limites em termos agregados e, mais importante, caso se extrapolem os limites calculados localmente.

As restrições ambientais a expansão da área agropecuária no Brasil e no mundo, colocam a irrigação como fronteira agrícola viável e sustentável, entretanto, o potencial brasileiro de 50Mha de hectares estimados correspondem a pouco mais de 3% da área mundial de 1,5 bilhões de hectares cultivada com culturas agrícolas segundo estimativas da FAO<sup>24</sup>. A principal conclusão é que o teto para aumento de produção agrícola não está distante do que atualmente se explora, impondo urgência no planejamento e gestão estratégica dos últimos recursos disponíveis.

---

<sup>24</sup> <http://www.fao.org/faostat/en/#data/>

## 5. HIERARQUIZAÇÃO DE REGIÕES PRIORITÁRIAS PARA A AGRICULTURA IRRIGADA

A definição de áreas prioritárias para agricultura irrigada é uma etapa importante para a interpretação da área adicional irrigável (AAI). Uma vez consolidada, a combinação da AAI com variáveis auxiliares possibilita detectar padrões de interação em um contexto de produção agropecuária. Esses padrões são aqui denominados “classes de agricultura irrigada” e servem como pano de fundo sobre o qual possam ser dispostos, de modo analítico, os programas, planos, projetos, e ações do Governo Federal que impactem no desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada. É também a partir da definição das classes que se evidencia a maneira com que a AAI pode ser racionalmente interpretada em termos de potencial factível de intensificação e expansão da atividade. Assim, a **Figura 50** resume a sequência lógica de combinação de variáveis para a hierarquização final das regiões prioritárias para a agricultura irrigada. As classes são definidas pela integração das informações de infraestrutura, área irrigada atual, área adicional irrigável (AAI) de intensificação e de expansão, além das poucas áreas adicionais irrigáveis pela água subterrânea computadas.

Entre os componentes utilizados na definição de áreas prioritárias, o indicador de infraestrutura permite avaliar o território brasileiro quanto à disponibilidade de infraestrutura para intensificação e expansão da agricultura irrigada. Similarmente, a identificação das áreas com uso atual da prática de irrigação também se torna importante para localizar as regiões que já apresentam uma possível infraestrutura e capital humano capacitado. Estes dois componentes, quando agrupados, permitem filtrar as regiões com maior potencial para irrigação no território brasileiro.

Por outro lado, o cruzamento completo também precisa levar em consideração a oferta hídrica por microbacia junto com a demanda potencial determinada pela simulação de cultivos agrícolas. Assim, o cruzamento da oferta com a demanda potencial resulta na área adicional irrigável. A divisão da AAI também é outro fator importante que precisa ser considerado, pois é necessário identificar as áreas de agricultura de sequeiro que podem ser intensificadas via irrigação, ou ainda determinar as áreas de pastagem que podem ser convertidas em agricultura irrigada. Estes dois últimos componentes, quando combinados com infraestrutura e área irrigada atual, auxiliam a identificação de áreas prioritárias para agricultura irrigada. Nas próximas seções serão apresentadas as descrições de cada componente utilizado nessa etapa do estudo, detalhando o banco de dados e seus respectivos processamentos, e finalizando com a apresentação e discussão dos resultados obtidos pela hierarquização das áreas prioritárias para agricultura irrigada no Brasil.

**Figura 50.** Variáveis utilizadas para definição das classes de agricultura irrigada



## 5.1 Indicador de infraestrutura

### Importância do componente energia

O setor produtivo agropecuário apresenta-se como um dos que mais consome energia elétrica. Diversos fatores contribuem para que esse alto consumo ocorra, desde os grandes volumes de água aplicados – seja pela demanda real das áreas irrigadas ou pela irrigação em excesso – até pelo fato de que os projetos de irrigação no Brasil, em geral, demandam motores de grande porte. Isso também se dá devido à localização das fontes de água (rios, represas e açudes), quase sempre na parte mais baixa do relevo nas propriedades, o que gera um alto consumo de energia para o bombeamento da água até os locais de plantio (SENAR, 2019<sup>25</sup>).

No Brasil, as unidades consumidoras são classificadas em dois grupos tarifários. O agrupamento é definido em função do nível de tensão em que são atendidos e, como consequência, em função da demanda (kW). O grupo A engloba as unidades consumidoras que estão ligadas à rede de tensão igual ou superior a 2,3 kV, sendo faturada pela demanda e consumo (tarifa binômica). Quando a unidade está ligada em uma rede de distribuição com tensão menor que 2,3 kV, a tarifa é determinada somente pelo consumo específico realizado em um determinado mês (tarifa monômica) (Grupo B). Desta forma, o grupo B é geralmente associado às áreas urbanas, incluindo iluminação pública, consumo residencial e atividade produtivas de baixa potência de unidades rurais (SENAR, 2019).

O grupo A é, portanto, a categoria que engloba a grande maioria das propriedades rurais que utilizam energia elétrica para irrigação. Essa observação justifica o uso da proximidade das linhas de distribuição de média (1 kV e 69 kV) e alta tensão (acima de 69 kV) no presente estudo. Entretanto, cabe salientar que para a unidade agropecuária contratar energia na concessionária, é necessário solicitar um estudo de viabilidade de demanda de energia no local onde se pretende instalar o projeto de irrigação. Caso haja essa disponibilidade, o irrigante deve apresentar os documentos comprobatórios de posse da terra, além dos documentos pessoais e do projeto elétrico que comprove a carga total a ser utilizada no empreendimento. A distribuidora é responsável pelo fornecimento, pela operação e pela manutenção até o ponto de entrega, o que caracteriza o limite da sua responsabilidade. O consumidor titular da unidade consumidora do Grupo A, por outro lado, é responsável pelas instalações necessárias ao rebaixamento da tensão, ao transporte de energia e à proteção dos sistemas posteriores ao ponto de entrega (SENAR, 2019<sup>25</sup>). Em ambos os casos, no entanto, os custos são bastante variados no território brasileiro, podendo tornar a prática de irrigação inviável em algumas situações.

---

<sup>25</sup> Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. Irrigação: gestão de água e energia elétrica. Brasília: Senar, nº 255, 84 p., 2019. Disponível em: <https://bit.ly/32h4CJT>.

## Importância da capacidade de armazenamento e modais de transporte

Como a produção agrícola é sazonal e o mercado de *commodities* agrícolas tem um comportamento oportunístico, a capacidade de armazenamento se torna um fator relevante no cômputo da infraestrutura disponível para expansão da agricultura irrigada<sup>26</sup>. Além disso, os produtos agrícolas são perecíveis e precisam ser adequadamente tratados para controlar as condições de temperatura e umidade durante a armazenagem. Outro fator relevante é que devido à dimensão continental do Brasil, os problemas de logística afetam a conservação dos produtos e escoamento de produção. Assim, este componente possui grande importância na definição de áreas prioritárias para agricultura irrigada<sup>27</sup>.

No que se refere ao transporte, os empreendimentos rurais sofrem com os constantes reajustes de preço do petróleo e combustível, impactando nos custos de entrega e saída de produtos agropecuários. No Brasil os produtos agrícolas percorrem em média mais de 1500 km em trechos terrestres. Isso afeta significativamente os custos de transporte e impactam na gestão da capacidade de armazenagem. Atualmente, cerca de 60% da matriz de transporte de cargas no Brasil é dependente das estradas. Dentro dessa realidade, há mais de 200 mil km de rodovias pavimentadas e somente 30 mil km de ferrovias, sendo que apenas um terço é de fato efetivo para a movimentação da produção agropecuária. Isso acontece porque todas as exportações, inclusive do centro-oeste, norte e nordeste, são realizadas majoritariamente a partir de portos do sul e sudeste<sup>27</sup>. Desta forma, a proximidade aos principais modais de transporte auxilia na identificação de áreas prioritárias para agricultura irrigada, uma vez que os custos associados ao transporte já são bastante significativos e a grande maioria dos corredores logísticos apresentam-se em condições inadequadas de conservação.

## Inserção do indicador de infraestrutura para a hierarquização de regiões

O indicador de infraestrutura, previamente descrito no capítulo 2 deste documento e calculado pelos componentes de energia, transporte e armazenagem, foi categorizado em três classes para ser utilizada na classificação da agricultura irrigada (**Figura 51**). Locais com alta infraestrutura favorecem a intensificação ou expansão da agricultura irrigada, uma vez que a irrigação demanda muita energia para seu funcionamento, e a distribuição de insumos e produção agrícola também é muito dependente do transporte e capacidade de armazenagem. Assim, o território brasileiro é dividido em categorias que permitem identificar as regiões que apresentam potencial de

---

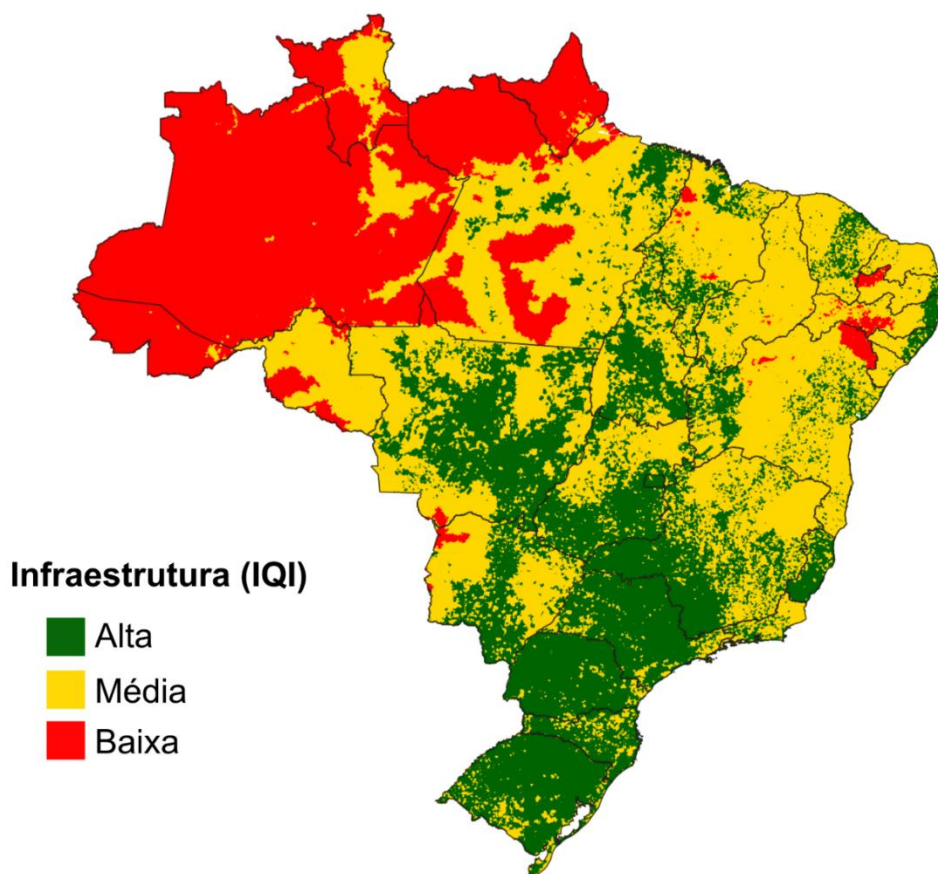
<sup>26</sup> Martins, R. S. et al. Decisões estratégicas na logística do agronegócio: compensação de custos transporte-armazenagem para a soja no estado do Paraná. Revista de Administração Contemporânea, v. 9, n. 1, p. 53–78, Mar. 2005.

<sup>27</sup> IONICS. Os desafios da logística no agronegócio e os caminhos para eficiência. Disponível em: <https://ionics.com.br/desafios-da-logistica-no-agronegocio>.



desenvolvimento a curto e médio prazo, uma vez que a infraestrutura pode ser melhorada via investimentos governamentais e privados.

**Figura 51.** Indicador de infraestrutura utilizado na classificação da agricultura irrigada



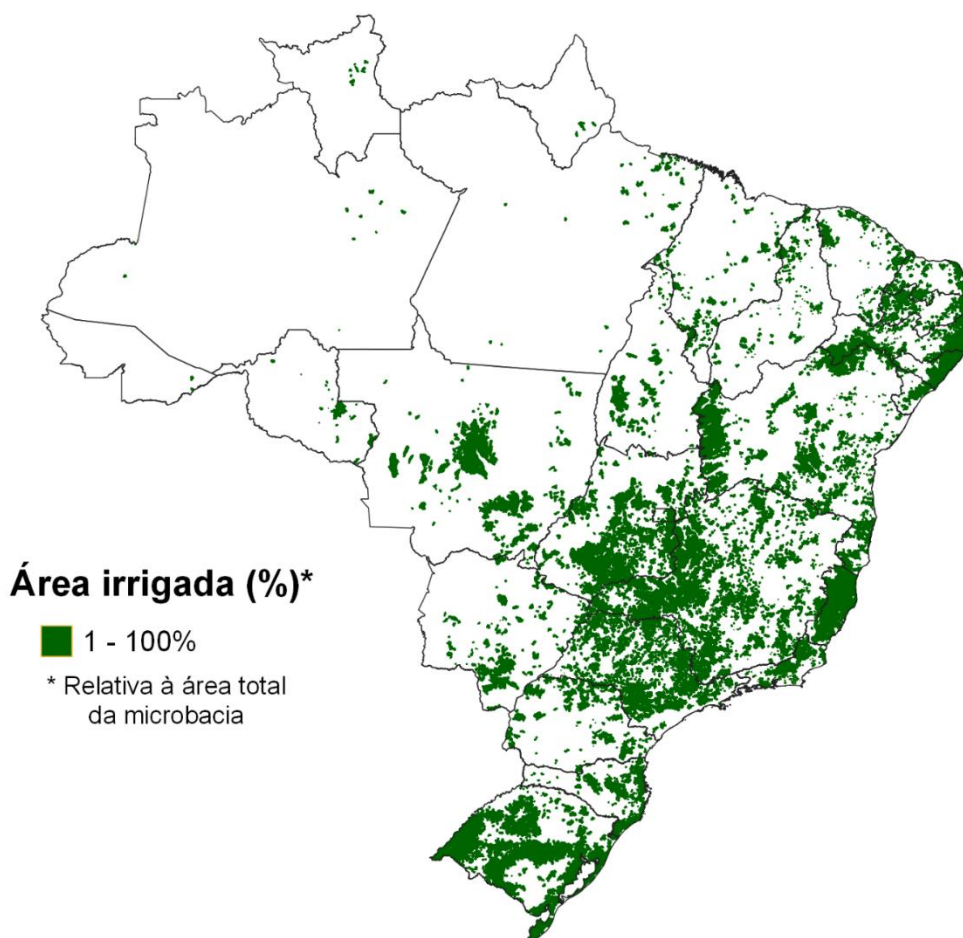
## 5.2 Área irrigada atual

Outro componente que auxilia na identificação de áreas prioritárias é o mapa de locais que já apresentam agricultura irrigada. Este componente é importante porque possibilita a identificação de regiões consolidadas com prática de irrigação, a qual pode refletir numa possível presença de infraestrutura e capital humano capacitado. Além disso, a identificação dos locais atuais com agricultura irrigada permite avaliar se determinada região já se encontra saturada com a atividade, precisando ser monitorada ou redirecionada para outro uso.

Para isso, a área irrigada foi estimada dentro de cada microbacia e uma classificação simples de ausência ou presença foi definida pela ocupação relativa na microbacia. O critério de ocupação relativa de área irrigada de 1% foi adotado por dois motivos. Primeiro por conta da existência de uma grande variação do tamanho da área de microbacia no território brasileiro. Em termos absolutos, uma microbacia de uma determinada região pode ter uma grande ocupação por área irrigada quando comparada

com outras microbacias de outras regiões do Brasil, e vice-versa. Por outro lado, se essa mesma área é relativizada pela área total da microbacia, essa ocupação pode ser considerada normalizada dentro do seu contexto regional. Além disso, a inspeção visual dos resultados revelou que o limiar de 1% possibilitou uma filtragem de locais com presença insignificativa da prática de irrigação, ao mesmo tempo que preservou a ocorrência de grandes núcleos regionais de agricultura irrigada (**Figura 52**).

**Figura 52.** Distribuição das microbacias com presença significativa de agricultura irrigada



### 5.3 Área adicional irrigável

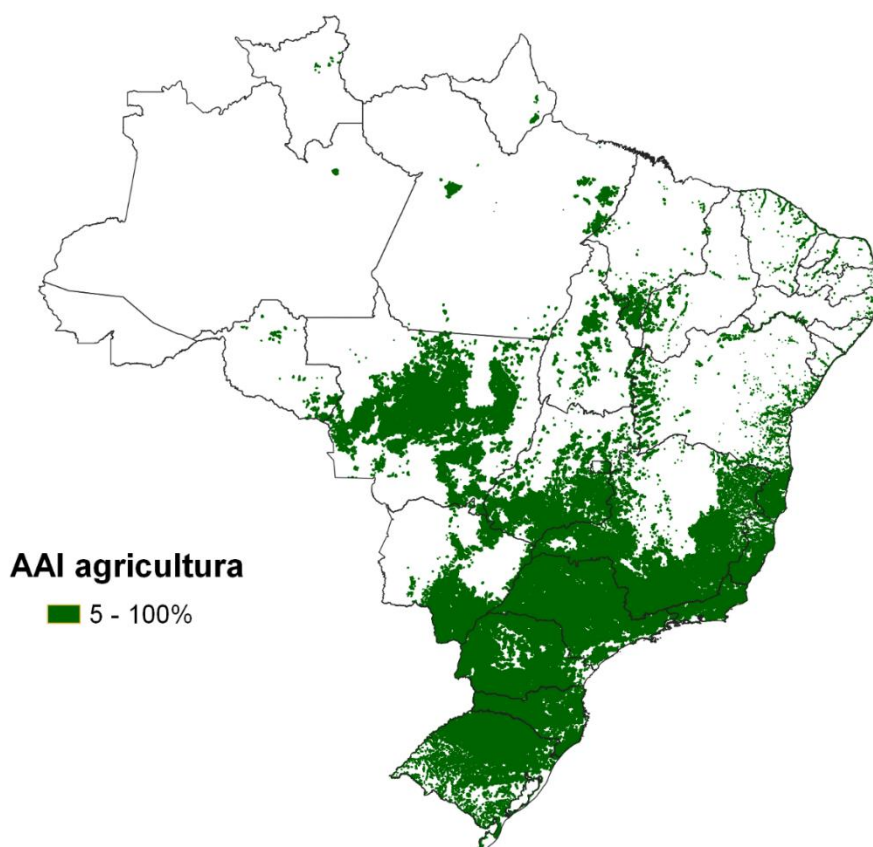
A área adicional irrigável (AAI) foi calculada a partir da simulação de culturas agrícolas considerando o uso e ocupação atual do território brasileiro. Nessa etapa, a disponibilidade de água superficial por curso de água foi estimada utilizando simulação computacional e os registros do monitoramento da vazão de cursos de água. O mapa de uso da terra também permitiu separar as áreas agrícolas de pastagens, as quais foram confrontadas com vazão unitária de projeto determinada pela simulação da demanda e oferta hídrica. O resultado da AAI foi então separado em AAI de intensificação e expansão, onde o primeiro representa o desenvolvimento da irrigação em agricultura de

sequeiro, enquanto o segundo implica na conversão do uso da terra de pastagem para agricultura irrigada.

A disponibilidade hídrica por águas subterrâneas também foi confrontada com a demanda hídrica de cultivos agrícolas, mas seu resultado foi adicionado no contexto de expansão da agricultura irrigada sobre pastagens após estimar os resultados por cursos de água superficiais. Esta medida foi adotada porque a exploração de águas subterrâneas envolve custos relativamente altos, requer o desenvolvimento de projetos mais sofisticados, tem legislação própria e é geralmente regulamentado em nível estadual, não se enquadrando no objetivo geral de definir áreas prioritárias.

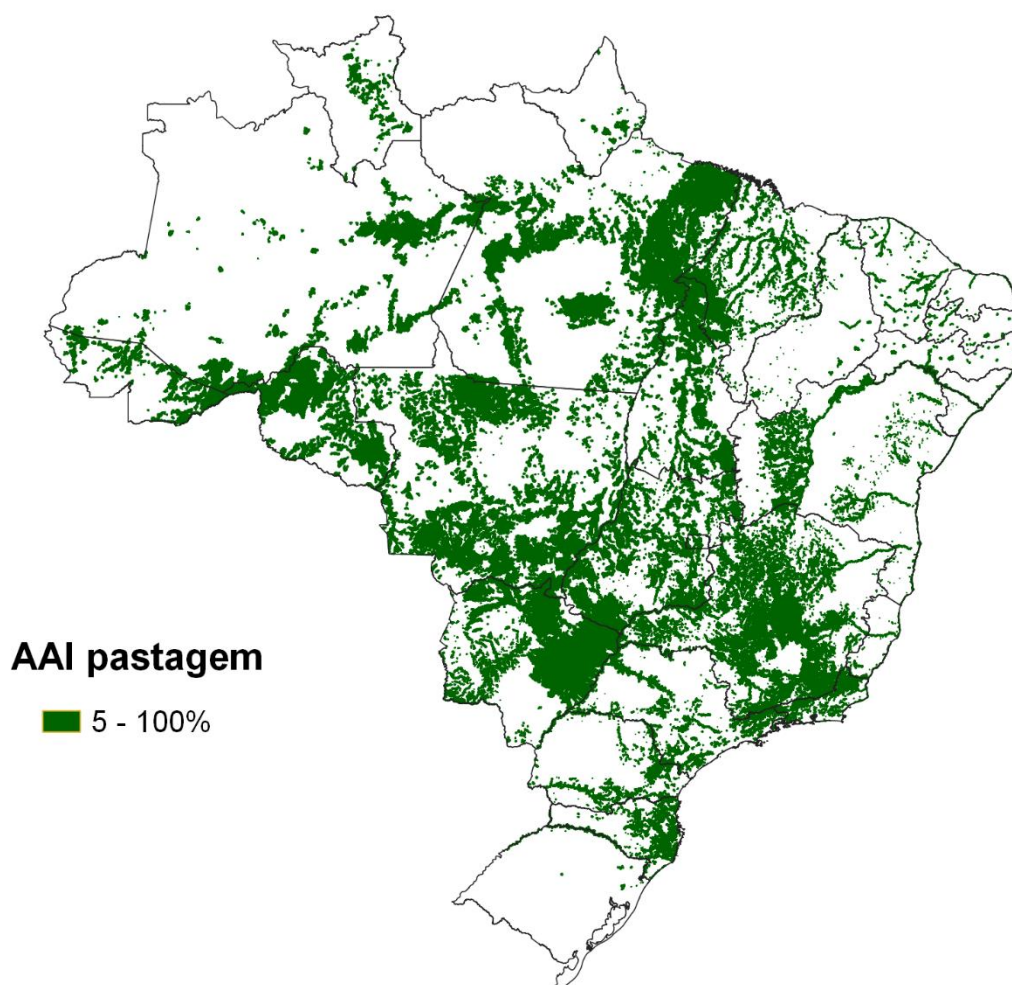
O mapa de AAI por intensificação revelou os locais com agricultura consolidada onde pode ser incentivada a prática de irrigação. Para a combinação com as demais variáveis de infraestrutura e agricultura irrigada atual, a AAI por intensificação das microbacias foi classificada em duas categorias: alta e baixa. Nessa etapa, microbacias com área relativa de AAI por intensificação acima de 5% foram classificadas como alta, enquanto as demais foram determinadas como baixa. Este critério foi utilizado após uma avaliação do efeito de diferentes limiares percentuais para o computo total de AAI por intensificação no território brasileiro. Além disso, áreas com baixa AAI puderam ser mais bem filtradas, otimizando a determinação de áreas prioritárias. O critério de 5% garantiu a representatividade de 92% de toda a AAI por intensificação disponível no território brasileiro (**Figura 53**).

**Figura 53.** Distribuição espacial da área adicional irrigável pela intensificação em agricultura de sequeiro disponível no nível de microbacia



Seguindo a mesma lógica de categorização anterior, a AAI por expansão também foi dividida em duas classes para ser combinada com os demais componentes da hierarquização. Similarmente, o critério de 5% garantiu a representatividade de 87% da área total disponível para expansão da agricultura irrigada, diminuindo o efeito de microbasias com baixa representatividade (**Figura 54**).

**Figura 54.** Área adicional irrigável pela expansão sobre áreas de pastagem disponível no nível de microbacia



#### 5.4 Classes de agricultura irrigada

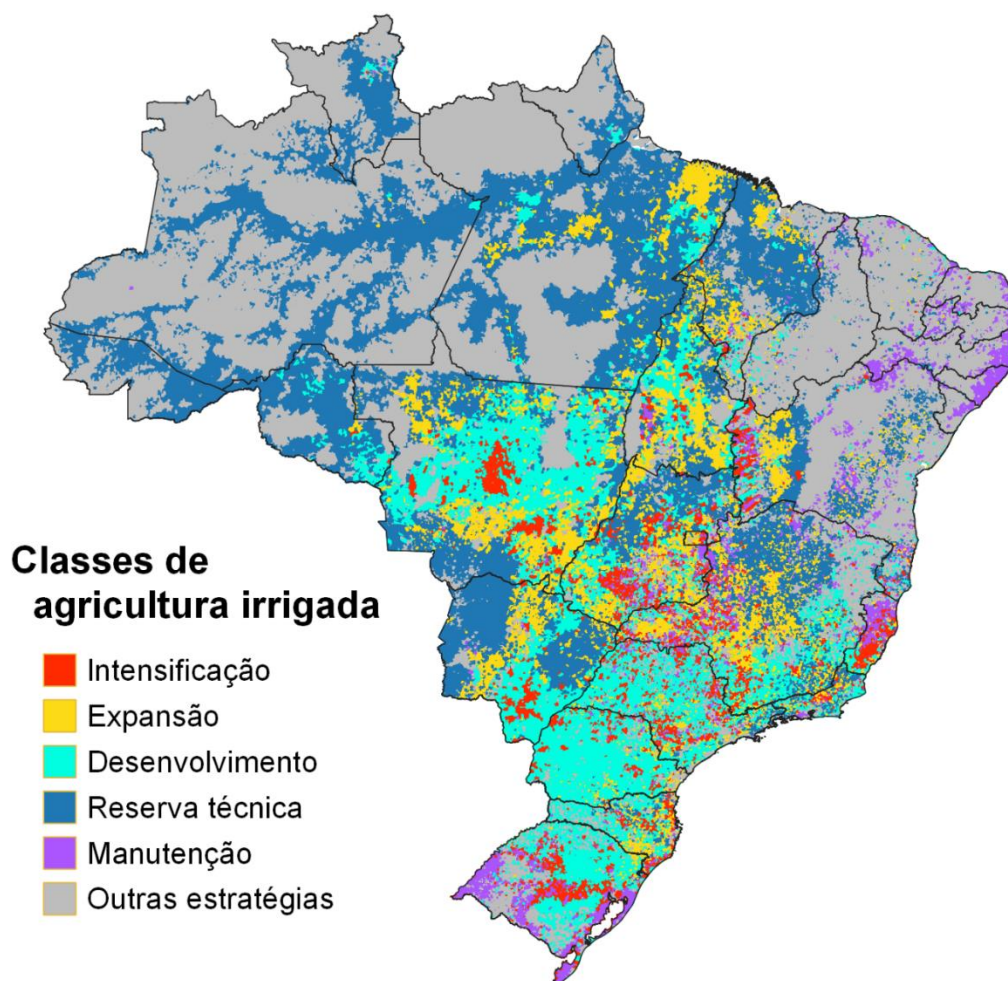
É a partir da definição das classes de agricultura irrigada que se evidencia a maneira pela qual a variável quantitativa **área adicional irrigável**, discutida ao longo do documento, pode ser racionalmente interpretada, em termos de potencial factível de expansão ou intensificação da atividade ou ainda em um cenário de uso da água subterrânea disponível. Deste modo, as classes de agricultura irrigada foram definidas considerando não somente a área irrigável disponível, mas também as características de infraestrutura e de histórico de irrigação. O resultado da combinação das variáveis foi investigado em relação à representatividade espacial (ocorrência) e em relação à utilidade para gestão e formulação de políticas públicas. Ou seja, nem todas as combinações são pertinentes para serem convertidas em classes territoriais e nem todas as combinações mapeiam locais de alto interesse para focalização de políticas públicas relacionadas à agricultura irrigada.

Nesta perspectiva, a variável categórica indicador de infraestrutura foi considerada hierarquicamente superior para a definição das classes territoriais de irrigação (**Tabela 11**). Em seguida, a presença de locais com agricultura irrigada consolidada também auxiliou na identificação de áreas prioritárias ou muito importantes para irrigação. Por fim, as áreas adicionais por intensificação e expansão se tornaram determinantes na hierarquização final, priorizando a agricultura de sequeiro justamente por essas últimas já estarem com uso consolidado e, potencialmente, poderem alcançar significativos incrementos de produtividade através da implantação da irrigação e do aproveitamento das estruturas já existentes, sem demandar alteração significativa nas atividades em curso. A combinação dos quatro componentes para hierarquização da agricultura irrigada resultou em diferentes classes: **intensificação, expansão, desenvolvimento, manutenção & redirecionamento, reserva técnica, e outras estratégias** (**Tabela 11 e Figura 55**).

**Tabela 11.** Lógica de combinação das variáveis para composição das classes de agricultura irrigada

Infraestrutura	Área Irrigada atual	AAI por Intensificação	AAI por Expansão	Classes de agricultura irrigada
Alta	Presente	Alta	Alta	Intensificação
			Baixa	Intensificação
		Baixa	Alta	Expansão
			Baixa	Manutenção & Redirecionamento
	Ausente	Alta	Alta	Desenvolvimento
			Baixa	Desenvolvimento
		Baixa	Alta	Expansão
			Baixa	Outras Estratégias
Média	Presente	Alta	Alta	Intensificação
			Baixa	Intensificação
		Baixa	Alta	Expansão
			Baixa	Manutenção & Redirecionamento
	Ausente	Alta	Alta	Desenvolvimento
			Baixa	Desenvolvimento
		Baixa	Alta	Reserva Técnica
			Baixa	Outras Estratégias
Baixa	Presente	Alta	Alta	Desenvolvimento
			Baixa	Desenvolvimento
		Baixa	Alta	Reserva Técnica
			Baixa	Manutenção & Redirecionamento
	Ausente	Alta	Alta	Reserva Técnica
			Baixa	Reserva Técnica
		Baixa	Alta	Reserva Técnica
			Baixa	Outras Estratégias

**Figura 55.** Classes de agricultura irrigada no território brasileiro categorizado no nível de microbacia



As classes de agricultura irrigada são caracterizadas na sequência:

- **Intensificação:** o que define essa classe de agricultura irrigada é a ocorrência da **alta área adicional irrigável de intensificação em regiões com grande tradição na prática de irrigação (presença de agricultura irrigada), juntamente com alta ou média infraestrutura disponível.** Em microbacias onde ocorre simultaneamente alta área adicional irrigável, tanto para expansão quanto para intensificação, o que prevalece para a definição da classe territorial é a intensificação. Isso porque, como mencionado anteriormente, é mais viável aproveitar as estruturas e instalações das áreas já consolidadas com agricultura de sequeiro para conduzir um processo de ganhos de produtividade do que planejar uma expansão da agricultura sobre as áreas consolidadas de pastagem, o que demandaria uma alteração significativa no uso da terra e perfil dos agricultores, provavelmente com altos custos associados. O nível de prioridade para destinar as ações de agricultura irrigada para as regiões classificadas



como intensificação depende, no entanto, da combinação entre o grau de dificuldade para sua instalação, grau de interesse e aptidão do meio físico. Neste sentido, a prioridade é superior quando o meio físico, definido tanto pelas condições de solo quanto de relevo, ainda tem capacidade de suportar a prática. As áreas mapeadas como classe de intensificação têm grande probabilidade de contar com infraestrutura suficiente e recursos humanos já preparados tecnicamente ao cultivo irrigado, e conseqüentemente mais chance de sucesso no incremento de produtividade. Além disso, a classe intensificação favorece a exploração de oportunidades de irrigação em épocas marginais para agricultura de sequeiro.

- **Expansão:** resultado da combinação de **alta área adicional irrigável por expansão, com a presença de alta ou média infraestrutura**. A classe caracterizada como expansão condiz com a condição em que o uso da terra atual é pastagem, e se sobrepõe a áreas em que o meio físico ainda tem capacidade de suportar uma expansão de áreas irrigadas sem comprometer o abastecimento público ou gerar conflitos de uso de recursos hídricos. Em outras palavras, esse cenário possibilita uma expansão da agricultura por meio da conversão das áreas de pasto. Neste sentido, dado o alto custo inerente ao processo de conversão de uso da terra de pastagem para a agricultura, é imprescindível que a classe de expansão seja feita em regiões onde já ocorra agricultura irrigada e que tenham alta infraestrutura, o que aumenta a probabilidade de contarem com infraestrutura suficiente e recursos humanos já preparados tecnicamente ao cultivo irrigado – minimizando o montante de custos necessários. O nível de prioridade para destinar as ações de agricultura irrigada para as regiões classificadas como expansão depende da combinação entre o grau de dificuldade para sua instalação, grau de interesse e aptidão do meio físico. Ações de irrigação complementares ao investimento em sistemas avançados de Integração Lavoura, Pecuária e Floresta podem ser oportunas nessas situações. A presença de infraestrutura ou ações públicas voltadas para a irrigação demonstram foco geográfico e acerto decisório de gestão. Caso não ocorra a presença ou tradição da prática de irrigação em microbacias com média infraestrutura, a classe de expansão se torna reserva técnica.

- **Desenvolvimento:** essa classe é resultante da presença de **alta área adicional irrigável por intensificação em locais com alta infraestrutura, mas sem ocorrer a agricultura irrigada na região**. Além disso, essa categoria pode acontecer em locais com baixa infraestrutura, mas que ocorra certa presença de agricultura irrigada na região. Desta forma, locais classificados como desenvolvimento apresentam grande potencial para estabelecer a agricultura irrigada em médio e longo prazos. Devido à disponibilidade de infraestrutura, microbacias com essa classe requerem o desenvolvimento da prática sobre agricultura de sequeiro. Neste sentido, a prática de irrigação pode aumentar significativamente a produção agrícola utilizando a mesma área. Por outro lado, como essa categoria ainda necessita do desenvolvimento tecnológico, é necessário estruturar a região com empresas especializadas em irrigação, e capacitar

técnicos e produtores rurais quanto às peculiaridades da prática para escaloná-la sobre a área disponível.

- **Reserva técnica:** resultante da combinação da **ausência de área irrigada, baixa infraestrutura, além de grandes proporções de área adicional irrigável de expansão**. Essa combinação indica regiões em que ainda não há agricultura irrigada, mas que podem ser importantes para a expansão da agricultura por apresentarem disponibilidade hídrica. A classe reserva técnica, portanto, aponta regiões estratégicas para enfoque a longo prazo, situadas em locais que ainda não apresentam uma dinâmica consolidada de produção agropecuária com emprego de tecnologia de irrigação, bem como demandam por um processo de conversão de área de pastagem para agricultura. Além disso, é necessário realizar grandes investimentos de infraestrutura para suportar a produção e escoamento agrícola. É preciso ainda mensurar formas de minimizar os custos elevados que seriam destinados tanto para o processo de conversão do uso da terra quanto para instalação de infraestrutura e capital humano necessários para a irrigação. A coincidência com um interesse extremo para conservação ambiental (região amazônica) mostra oportunidades de poupar investimentos direcionados a essas áreas para um uso não produtivo.

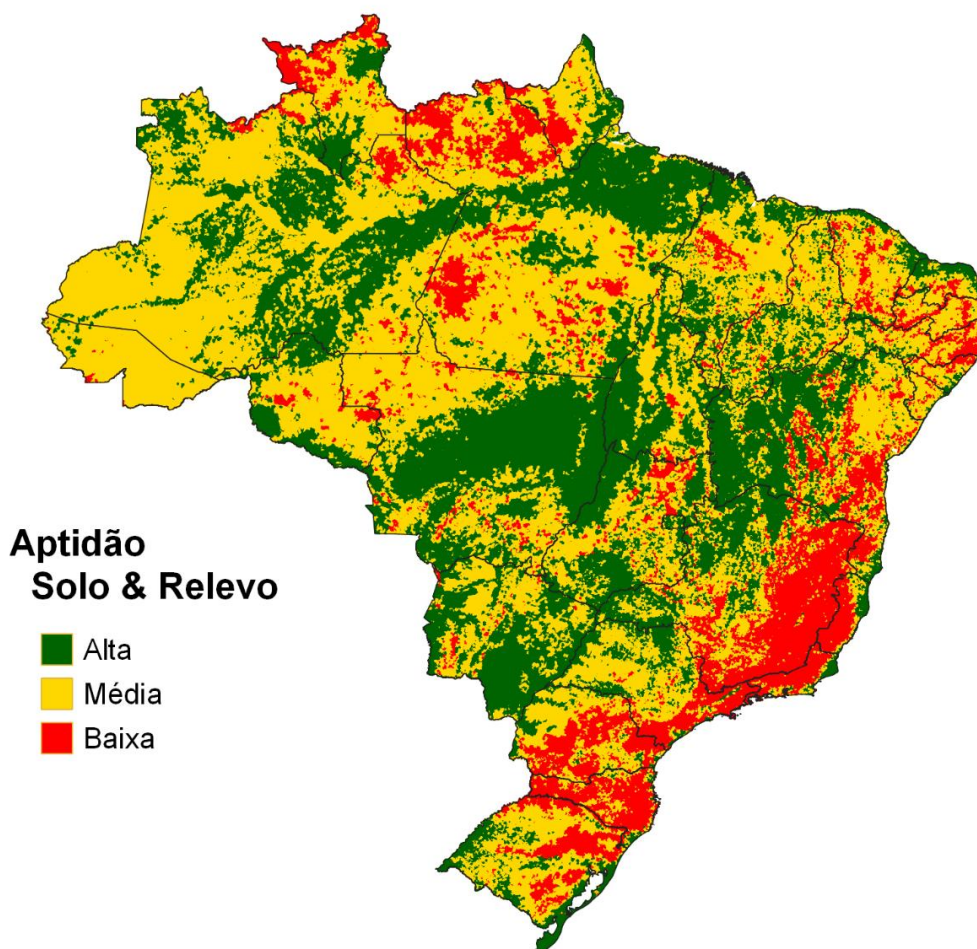
- **Manutenção & Redirecionamento:** Resultante da combinação de **alta área irrigada, mas com baixa área adicional irrigável em ambos os cenários de intensificação e expansão**. Para esta classe, a agricultura irrigada já faz parte da matriz produtiva, porém os recursos hídricos não apresentam mais capacidade de suportar uma expansão da atividade, indicando condições de provável conflito pelo uso da água. Esse tipo de situação é estratégico para intervenção pública no apoio e criação de alternativas à agricultura irrigada, bem como no gerenciamento e racionalização do uso da água. Investimentos em obras de infraestrutura para represamento, canais de transposição e perfuração de poços se mostram potenciais nessa configuração.

- **Outras estratégias:** resultado da combinação de **baixa área irrigada e baixa área adicional irrigável de expansão intensificação**. Esta classe identifica regiões em que a agricultura irrigada ainda não faz parte da matriz produtiva e que o desenvolvimento da agricultura não depende essencialmente de irrigação. São áreas para observação e aproveitamento de outras oportunidades onde essas se mostrarem viáveis. A principal utilidade da classe é evidenciar espacialmente locais em que o poder público pode concentrar esforços em políticas alternativas à irrigação para o desenvolvimento da agropecuária ou então inserir essas regiões em uma agenda de planejamento de longo prazo. Atividades tradicionalmente pouco vinculadas à irrigação como a pecuária ou silvicultura podem ser opções ao desenvolvimento local. Uma combinação com classes territoriais de caracterização rural poderia evidenciar quais configurações de aptidão agrícola, desenvolvimento, matriz fundiária e interesse ambiental essa situação ocorre, permitindo uma melhor objetividade na definição de estratégias e orientação específica.

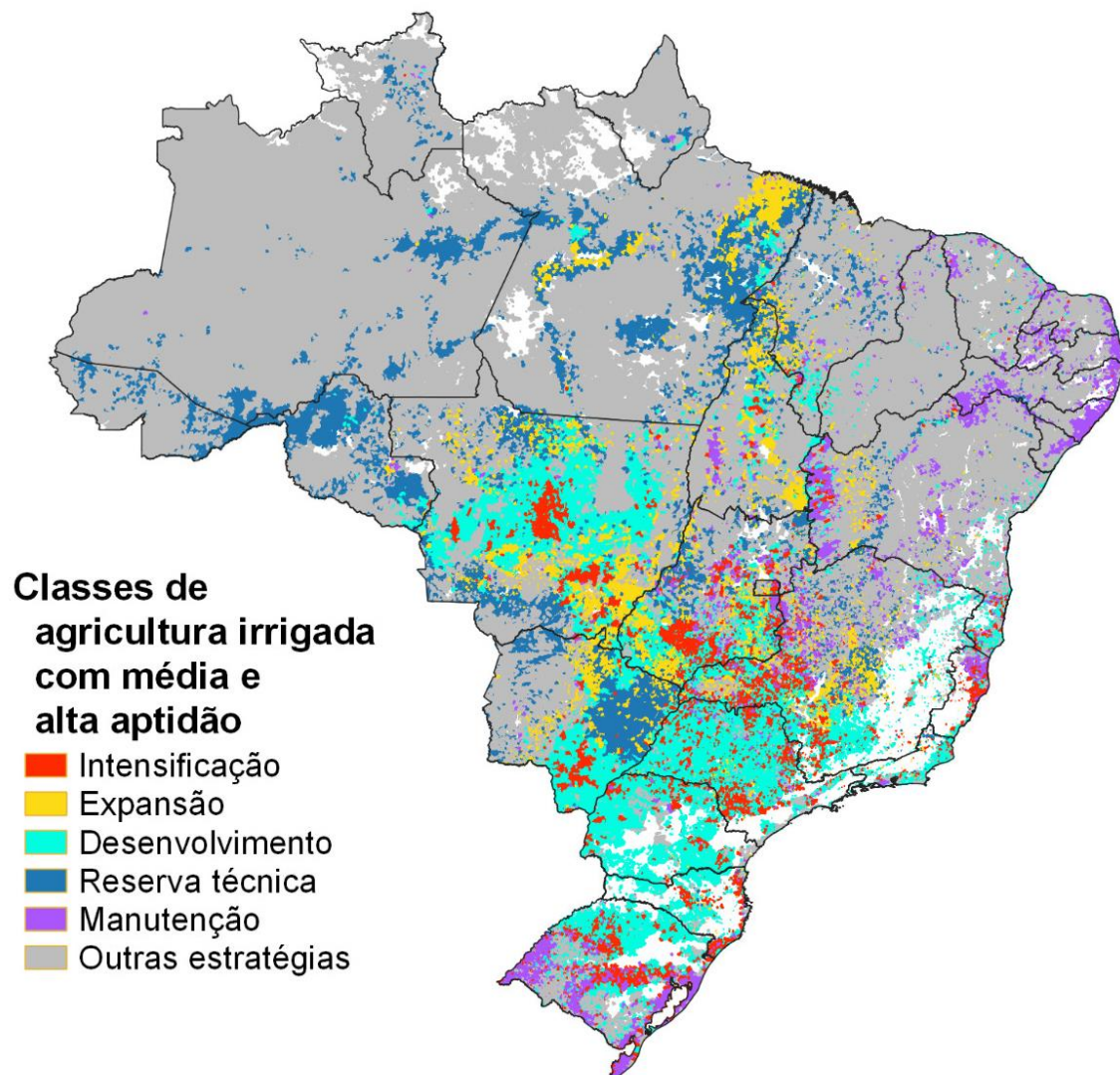
## 5.5 Aptidão do meio físico e classes de agricultura irrigada

Uma vez consolidada as classes de agricultura irrigada, também é oportuno utilizar o mapa de aptidão do meio físico para identificar regiões de grande interesse para intervenção. O mapa de aptidão do meio físico considera as características de solo e relevo, uma vez que o fator climático (disponibilidade de água) pode ser manejado pela irrigação. Neste sentido, três classes de aptidão foram determinadas para o território brasileiro (**Figura 56**). Quando a alta e média aptidão do meio físico foi, conjuntamente, combinada com as classes de agricultura irrigada, as regiões prioritárias para intervenção puderam ser facilmente identificadas no território brasileiro (**Figura 57**), onde as áreas de baixa aptidão estão indicadas em branco. Além de apresentar a distribuição espacial das classes de agricultura irrigada para as regiões de baixa e alta (neste caso sendo composta pela soma de áreas de alta e baixa aptidão), a **Figura 58** também apresenta, individualmente, a distribuição das classes para as regiões de baixa, média e alta aptidão.

**Figura 56.** Classes de aptidão do meio físico considerados os componentes Solo e Relevo



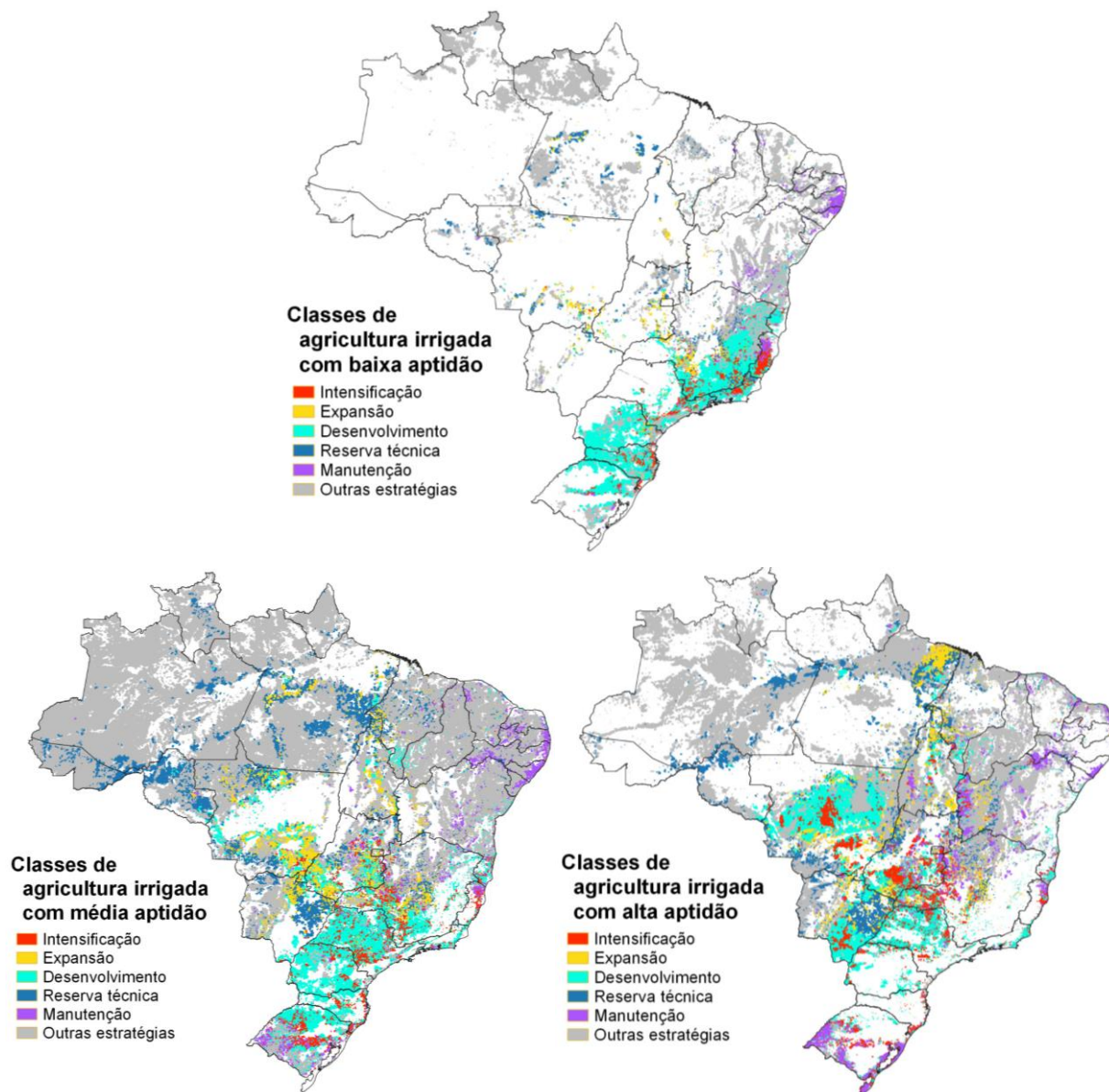
**Figura 57.** Classes de agricultura irrigada dentro da categoria de média e alta (conjuntamente) aptidão do meio físico



\*Neste mapa soma-se as áreas de **alta e média** aptidão (indicadas na Figura 56)

\*\*Regiões em branco representam áreas de baixa aptidão.

**Figura 58.** Classes de agricultura irrigada dentro da categoria de baixa, média e alta aptidão do meio físico



## 5.6 Análise descritiva das classes de agricultura irrigada

A análise dos resultados da hierarquização da agricultura irrigada revelou que dentro do montante total de área adicional irrigável, cerca de **21 milhões de hectares (Mha) se encontram na classe “desenvolvimento” (Tabela 12)**. Além disso, **13,5 Mha estão alocados dentro da classe “reserva técnica”**, a qual representa uma classe de agricultura irrigada que pode ser explorada a longo prazo. Considerando as classes de **intensificação e expansão**, as quais representam uma exploração imediata do território, o montante alocado para estas duas classes foi de cerca de **8 e 7.5 Mha**,

**respectivamente**, representando cerca de 15,6 Mha quando somadas (**Tabela 12** Erro! Fonte de referência não encontrada.).

**Tabela 12.** Resultados principais da hierarquização da agricultura irrigada

<b>Classes de agricultura irrigada</b>	<b>AAI total (hectares)</b>
Intensificação	8.083.594
Expansão	7.535.546
Desenvolvimento	21.810.451
Reserva técnica	13.544.633
Manutenção	420.248
Outras estratégias	4.456.756
<b>Total</b>	<b>55.851.229</b>

Uma análise mais detalhada dentro do território brasileiro revela aspectos adicionais sobre a distribuição espacial das classes de agricultura irrigada (**Tabela 13**). Dentre as grandes regiões do território brasileiro, a região centro-oeste apresenta a maior área adicional irrigável total de 19,7 Mha (considerando água superficial e subterrânea), independente da classe de irrigação, enquanto a região nordeste apresentou 3,3 Mha. Considerando as classes de agricultura irrigada, **consideráveis quantidades de áreas classificadas como intensificação se concentram nas regiões centro-oeste, sudeste, e sul, com montantes de 2,9, 2,8 e 1,8 Mha, respectivamente. Na classe de expansão, grandes proporções se concentram na região centro-oeste, norte e sudeste.** A classe de desenvolvimento, com maior proporção entre as demais classes de agricultura irrigada, apresenta seus valores mais concentrados na região sudeste, centro-oeste e sul. Há também uma grande proporção de reserva técnica nas regiões norte e centro-oeste, enquanto a classe de manutenção é mais evidente para a região nordeste e sudeste. Por fim, regiões demarcadas como outras estratégias são mais frequentes na região norte e centro-oeste.

O estado do Mato Grosso apresenta maior área absoluta classificada como intensificação, seguido pelos estados de Minas Gerais, São Paulo e Goiás, todos com área acima de 1 Mha. Na categoria expansão, Mato Grosso com mais de 2 Mha, e Goiás e Minas Gerais, ambos com mais de 1 Mha, se destacam. Estados da região sul, sudeste e centro-oeste apresentam grandes proporções para a classe de desenvolvimento. Em contrapartida, somente a região norte e centro-oeste apresentam áreas relativamente significantes para a classe de reserva técnica, com destaque para a Região Norte com mais de 7 Mha. Os estados da Bahia e Minas Gerais se destacam também com as maiores proporções de áreas demarcadas como manutenção, enquanto outras

estratégias são significantes no estado do Pará, e comparativamente significativo em algumas áreas de MG e MT (**Tabela 13**).

**Tabela 13.** Resultados da hierarquização da agricultura irrigada para os estados e grande regiões brasileiras.

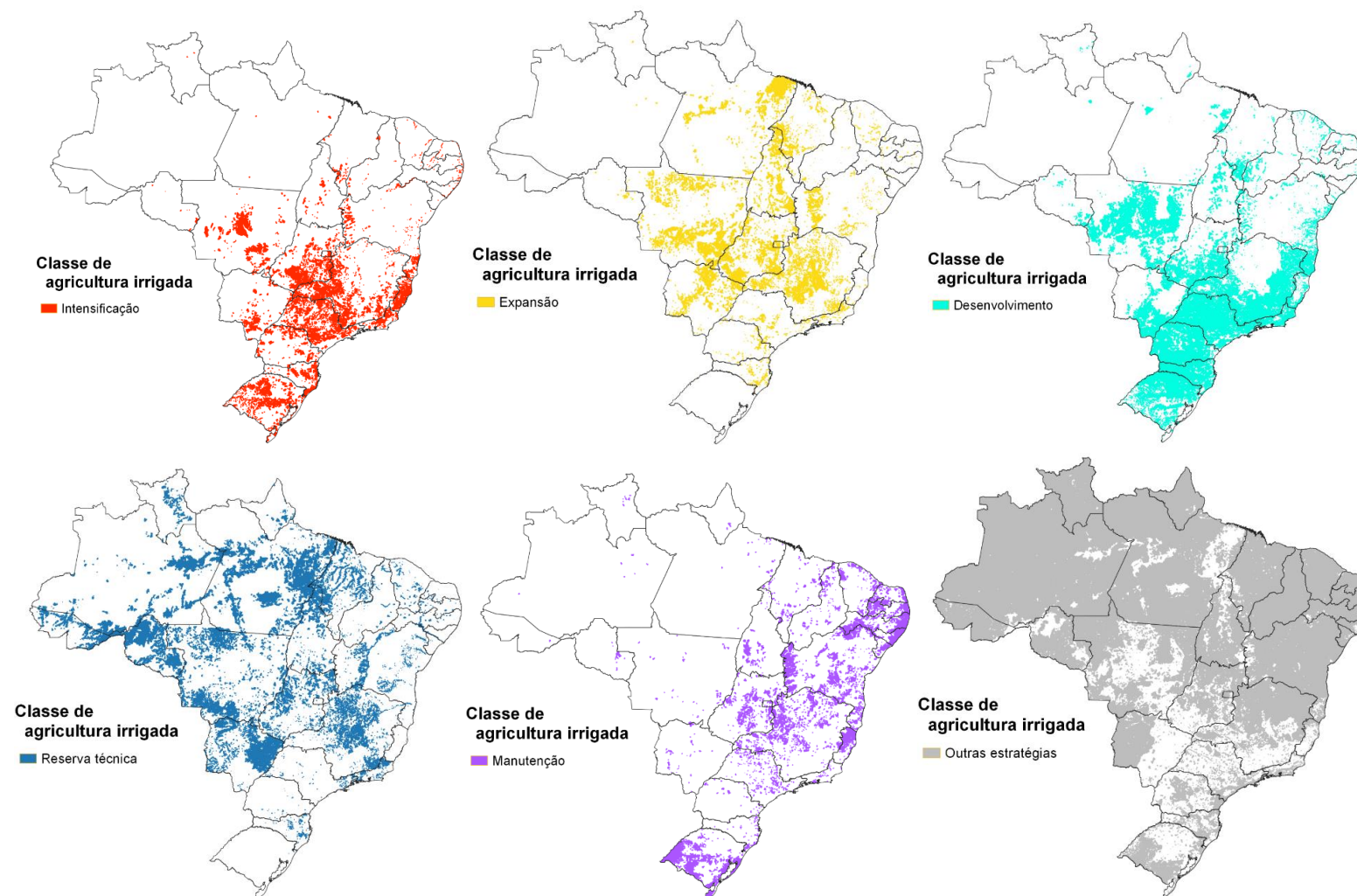
	<b>Intensificação</b>	<b>Expansão</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>Reserva técnica</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Outras estratégias</b>	<b>Total</b>
RO	27.589	56.071	128.116	2.075.162	5.965	206.770	2.499.673
AC	--	--	--	574.593	459	115.772	690.824
AM	--	1.529	5.644	1.084.907	762	335.697	1.428.538
RR	1.212	2.254	3.001	132.497	445	84.496	223.905
PA	5.834	882.365	161.730	3.000.620	5.621	629.390	4.685.561
AP	--	--	12.099	35.753	439	53.353	101.644
TO	89.586	594.776	252.578	446.588	21.986	258.078	1.663.592
<b>Norte</b>	<b>124.221</b>	<b>1.536.994</b>	<b>563.169</b>	<b>7.350.120</b>	<b>35.678</b>	<b>1.683.556</b>	<b>11.293.737</b>
MA	33.179	216.108	112.123	552.875	13.112	230.641	1.158.039
PI	8.193	9.420	45.222	23.186	5.520	85.817	177.357
CE	15.635	22.665	77.747	39.529	789	14.609	170.974
RN	14.453	1.108	22.215	3.232	998	4.480	46.485
PB	12.171	4.691	6.158	9.601	1.248	2.520	36.389
PE	25.093	2.914	16.792	42.622	2.378	2.143	91.941
AL	24.203	4.691	3.323	9.056	3.391	416	45.078
SE	1.946	963	16.688	3.922	321	2.323	26.163
<b>Nordeste</b>	<b>322.206</b>	<b>568.206</b>	<b>607.838</b>	<b>1.036.212</b>	<b>109.298</b>	<b>671.905</b>	<b>3.315.665</b>
BA	187.334	305.645	307.571	352.190	81.542	328.956	1.563.239
MG	1.255.755	1.109.226	3.221.963	902.784	84.383	457.183	7.031.295
ES	227.720	6.011	119.148	470	18.787	11.103	383.240
RJ	154.440	33.809	339.486	72.094	2.926	22.400	625.154
SP	1.215.408	52.207	3.529.264	21.651	20.118	71.049	4.909.697
<b>Sudeste</b>	<b>2.853.323</b>	<b>1.201.254</b>	<b>7.209.861</b>	<b>996.999</b>	<b>126.213</b>	<b>561.735</b>	<b>12.949.386</b>
PR	510.094	50.999	3.376.466	3.256	4.562	124.031	4.069.407
SC	353.352	27.598	1.038.310	26.887	3.509	55.670	1.505.326
RS	962.141	897	1.839.949	117	51.180	160.641	3.014.924
<b>Sul</b>	<b>1.825.586</b>	<b>79.494</b>	<b>6.254.725</b>	<b>30.260</b>	<b>59.251</b>	<b>340.341</b>	<b>8.589.657</b>
MS	458.587	836.365	1.416.689	1.752.949	6.988	240.657	4.712.236
MT	1.467.319	2.163.969	4.465.480	1.587.931	10.189	661.197	10.356.084
GO	1.004.675	1.133.172	1.290.207	789.943	71.648	292.659	4.582.304
DF	27.677	16.092	2.481	218	982	4.707	52.158
<b>Centro-Oeste</b>	<b>2.958.258</b>	<b>4.149.598</b>	<b>7.174.858</b>	<b>4.131.042</b>	<b>89.808</b>	<b>1.199.219</b>	<b>19.702.782</b>
<b>Total</b>	<b>8.083.594</b>	<b>7.535.546</b>	<b>21.810.451</b>	<b>13.544.633</b>	<b>420.248</b>	<b>4.456.756</b>	<b>55.851.229</b>



Diante disso, **a hierarquização da agricultura irrigada revela que para transição imediata, considerando as categorias de intensificação e expansão, cerca de 15,6 milhões de hectares podem ser considerados prontamente disponíveis.** As classes de reserva técnica, manutenção e outras estratégias, quando agrupadas, representam cerca de 18,5 Mha do território nacional. Por fim, a classe de desenvolvimento, a qual apresentou a maior cobertura no território brasileiro, representa por volta de 21,8 Mha do montante total de área adicional irrigável. Assim, **este estudo revela uma proporção relativamente uniforme para o potencial total de área adicional irrigável, com 28% podendo ser exploradas imediatamente, 39% da área possuindo potencial a médio prazo via desenvolvimento tecnológico, e o saldo remanescente de 33% apresenta maiores restrições para exploração, mesmo apresentando potencial hídrico.**

Por fim, para melhor detalhamento visual, as classes de agricultura irrigada também foram separadas para facilitar a distribuição individual. É oportuno lembrar que, devido aos efeitos de pirâmides de visualização, os mapas separados podem proporcionar uma impressão de sobreposição de classes no nível de visualização do território brasileiro. Assim, é importante conferir o mapa com todas as classes, um nível de visualização mais detalhista, em escala regional. Na **Figura 59** são apresentados os resultados da separação.

**Figura 59.** Classes de agricultura irrigada distribuídas no território nacional



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados e principais procedimentos para obtenção da área adicional irrigável para o território brasileiro foram apresentados neste estudo. Para o alcance deste objetivo, o estudo destacou os procedimentos para cálculo dos três principais eixos de processamento: (i) o primeiro componente refere-se área agricultável – por meio da aplicação de filtros para a remoção de áreas com restrições físicas e ambientais sobre o mapa de uso da terra com áreas consolidadas de agricultura e pastagem; (ii) o segundo refere-se à demanda hídrica, baseada na simulação do balanço hídrico de quatro diferentes culturas - milho, feijão, arroz e cana-de-açúcar, na estimativa da vazão unitária de projeto e na contabilização da disponibilidade hídrica da microbacia; e (iii) o terceiro eixo refere-se à disponibilidade hídrica - a qual apresenta a quantidade de água disponível à agricultura irrigada atualmente no território brasileiro.

A área adicional irrigável representa os locais com disponibilidade hídrica superficial para adoção da irrigação, distinguindo os com potencial de intensificação de agricultura de sequeiro através da irrigação (“intensificação”) e as áreas com potencial de expansão da agricultura irrigada sobre pastagens consolidadas (“expansão”). **Os resultados obtidos apontam um potencial de intensificação de, aproximadamente, 26,69Mha de áreas agrícolas por meio da irrigação no Brasil.** Por outro lado, **há também um potencial de adotar irrigação em uma área de mais 26,72Mha, atualmente cobertas por pastagens** – as quais podem ser, eventualmente, convertidas para produção agrícola no país. Somados os dois cenários, de intensificação e expansão, são estimados aproximadamente 53,4Mha adicionais para a irrigação em todo o território brasileiro. Além disso, o estudo aponta que o Brasil apresenta cerca de 2,4Mha de área adicional irrigável com base na água subterrânea disponível.

Por outro lado, ao focalizar em uma hierarquização de áreas prioritárias para as ações e programas voltados a agricultura irrigada, o presente estudo mostrou que a estimativa de área adicional irrigável pode e deve ser concatenada a variáveis de infraestrutura e aptidão agrícola para ganhar aderência com agendas reais. Dessa forma, o número agregado de 53,4 Mha de incremento potencial de irrigação ganha contornos do que significa em cada região e em cada microbacia do país. Há locais para desenvolvimento em curto prazo com poucas restrições a serem vencidas, há locais em que é necessário investir em agendas visando resultados em médio e longo prazos, há locais em que a capacidade de incremento de irrigação é limitada pelo esgotamento ou indisponibilidade de recursos hídricos e há locais em que se deve dar ênfase para outras estratégias de desenvolvimento. Cada uma dessas diferentes condições foi mapeada e quantificada, resultando em informação útil ao planejamento de ações e construção de agendas consequentes na escala municipal, microrregional, estadual, regional ou nacional.

É importante ressaltar que este estudo teve em sua execução um caráter de intenso desenvolvimento metodológico, processamento de dados e consolidação de resultados. Nesse contexto, entende-se que a conclusão do estudo não deva configurar o término de um processo analítico ou a consolidação de certezas. Deve, entretanto, abrir espaço para um aprofundamento das questões colocadas, mediante a realização de estudos que possam validar e também complementar os conceitos e cálculos aqui propostos. A agregação e ampliação de competências metodológicas às aqui apresentadas e investigações detalhadas de campo, a fim de captar a complexidade, são sequências desejadas e necessárias, assim como a discussão aberta com a comunidade científica, técnica e operacional envolvida no tema da irrigação. A disponibilização aberta das bases de dados e dos detalhes metodológicos utilizados neste estudo pode contribuir para esta finalidade.

A análise territorial e modelagem espacial na rotina de formulação e gestão de governança pública e sua interface com a governança privada constituem processos dinâmicos, que se beneficiam da discussão conjunta de cenários e incorporação de ajustes na forma de interpretação das variáveis. Entende-se que a consolidação metodológica alcançada neste estudo constitui uma importante contribuição neste processo.

## ANEXOS

### ANEXO I – METADADOS DOS BANCO DE DADOS PROCESSADOS E NÃO PROCESSADOS

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
idbacia	Identificador único de microbacias	Categórica	Inteiro	Vetor	microbacia	ANA	input
cobacia	Identificador de microbacias	Categórica	Inteiro	Vetor	microbacia	ANA	input
PERCENTAGE	Percentual de área da microbacia sobre o município a qual pertence	Contínua		Tabular	microbacia	GPP/USP	output
cd_mun	Código do município	Categórica	Inteiro	Tabular	município	IBGE	input
microrreg	Código da microrregião	Categórica	Inteiro	Tabular	microrregião	IBGE	Input
dispq95	Disponibilidade hídrica Q95% (m <sup>3</sup> /s)	Numérica	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	ANA	input
prec_daily_UT_Brazil	Precipitação diária de 01/1980 até 12/2016	Contínua	mm.dia <sup>-1</sup>	Raster netcdf3	0.25° (graus)	Xavier et. al, 2016	Input
RH_daily_UT_Brazil	Umidade relativa do ar diária de 01/1980 até 12/2016	Contínua	%	Raster netcdf3	0.25° (graus)	Xavier et. al, 2016	Input
Rs_daily_UT_Brazil	Saldo de radiação diário de 01/1980 até 12/2016	Contínua	MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	Raster netcdf3	0.25° (graus)	Xavier et. al, 2016	input
Tmax_daily_UT_Brazil	Temperatura máxima diária de 01/1980 até 12/2016	Contínua	Graus celsius	Raster netcdf3	0.25° (graus)	Xavier et. al, 2016	Input
Tmin_daily_UT_Brazil	Temperatura média diária de 01/1980 até 12/2016	Contínua	Graus celsius	Raster netcdf3	0.25° (graus)	Xavier et. al, 2016	Input
u2_daily_UT_Brazil	Velocidade do vento diária de 01/1980 até 12/2016	Contínua	m.s <sup>-1</sup>	Raster netcdf3	0.25° (graus)	Xavier et. al, 2016	Input
KCini_milho	Coefficiente de cultura para estágio inicial da cultura do milho	Contínua	adimensional	Numérico	--	ALLEN, R. G et al. Crop	Input

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
						evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).	
KC <sub>mid,milho</sub>	Coeficiente de cultura para estágio médio da cultura do milho	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	Input
KC <sub>fin,milho</sub>	Coeficiente de cultura para estágio final da cultura do milho	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	Input
L <sub>ini,milho</sub>	Duração da fase fenológica inicial para cultura do milho	Contínua	dias	Numérico	--	Boletim FAO 56	Input
L <sub>dev,milho</sub>	Duração da fase fenológica de crescimento vegetativo para cultura do milho	Contínua	dias	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>mid,milho</sub>	Duração da fase fenológica reprodutiva para cultura do milho	Contínua	dias	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>late,milho</sub>	Duração da fase fenológica de maturação para cultura do milho	Contínua	dias	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
profundidade <sub>milho</sub>	Profundidade do sistema radicular para a cultura do milho	Contínua	metros	Número		GPP/USP e ANA	input
KC <sub>ini,feijão</sub>	Coeficiente de cultura para estágio inicial da cultura do feijão	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
KC <sub>min,feijão</sub>	Coeficiente de cultura para estágio médio da cultura do feijão	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
KC <sub>fin,feijão</sub>	Coeficiente de cultura para estágio final da cultura do feijão	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>ini,feijão</sub>	Duração da fase fenológica inicial para cultura do feijão	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>dev,feijão</sub>	Duração da fase fenológica de crescimento vegetativo para cultura do feijão	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>mid,feijão</sub>	Duração da fase fenológica reprodutiva para cultura do feijão	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>late,feijão</sub>	Duração da fase fenológica de maturação para cultura do feijão	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
Profundidade <sub>eFeijao</sub>	Profundidade do sistema radicular para a cultura do feijão	Contínua	metros	Número		GPP/USP e ANA	input
KC <sub>ini,cana</sub>	Coeficiente de cultura para estágio inicial da cultura do cana-de-açúcar	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
KC <sub>min,cana</sub>	Coeficiente de cultura para estágio médio da cultura do cana-de-açúcar	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
KC <sub>fin,cana</sub>	Coeficiente de cultura para estágio final da cultura do cana-de-açúcar	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>ini,cana</sub>	Duração da fase fenológica inicial para cultura do cana-de-açúcar	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>dev,cana</sub>	Duração da fase fenológica de crescimento vegetativo para cultura do cana-de-açúcar	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
L <sub>mid,cana</sub>	Duração da fase fenológica reprodutiva para cultura do cana-de-açúcar	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>late,cana</sub>	Duração da fase fenológica de maturação para cultura do cana-de-açúcar	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
Profundidade <sub>cana</sub>	Profundidade do sistema radicular para a cultura do cana-de-açúcar	Contínua	metros	Númerico		GPP/USP e ANA	input
K <sub>Cini,arroz</sub>	Coefficiente de cultura para estágio inicial da cultura do arroz	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
K <sub>Cmin,arroz</sub>	Coefficiente de cultura para estágio médio da cultura do arroz	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
K <sub>Cfin,arroz</sub>	Coefficiente de cultura para estágio final da cultura do arroz	Contínua	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>ini,arroz</sub>	Duração da fase fenológica inicial para cultura do arroz	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>dev,arroz</sub>	Duração da fase fenológica de crescimento vegetativo para cultura do arroz	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>mid,arroz</sub>	Duração da fase fenológica reprodutiva para cultura do arroz	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
L <sub>late,arroz</sub>	Duração da fase fenológica de maturação para cultura do arroz	dias	adimensional	Numérico	--	Boletim FAO 56	input
Profundidade <sub>arroz</sub>	Profundidade do sistema radicular para a cultura do arroz	Contínua	metros	Númerico		GPP/USP e ANA	input
CAD	Água disponível no solo	Contínua	mm.m <sup>-1</sup>	Vetor	1:25000	ANA e UFPR (2020)	input
t <sub>sup</sub>	Tempo de irrigação para método de irrigação superficial	Contínua	horas	Numérico	--	GPP/USP e ANA	input



Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
$t_{press}$	Tempo de irrigação para método de irrigação pressurizada	Contínua	horas	Numérico	--	GPP/USP e ANA	input
$lf_{sup}$	Inverso da eficiência de uso da água para o método de irrigação superficial	Contínua	adimensional	Numérico	--	GPP/USP e ANA	input
$lf_{press}$	Inverso da eficiência de uso da água para o método de irrigação pressurizada	Contínua	adimensional	Numérico	--	GPP/USP e ANA	input
Lat	Latitude dos pontos de simulação do BHO	Contínua	graus	Raster netcdf3	0.25° (graus)	Xavier et. al, 2016	input
Long	Longitude dos pontos de simulação do BHO	Contínua	graus	Raster netcdf3	0.25° (graus)	Xavier et. al, 2016	input
$ETC_{milho}$	Evapotranspiração potencial de cultura para o milho	Contínua	mm.dia <sup>-1</sup>	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
$ETC_{feijão}$	Evapotranspiração potencial de cultura para o feijão	Contínua	mm.dia <sup>-1</sup>	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
$ETC_{arroz}$	Evapotranspiração potencial de cultura para o arroz	Contínua	mm.dia <sup>-1</sup>	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
$ETC_{cana}$	Evapotranspiração potencial de cultura para a cana-de-açúcar	Contínua	mm.dia <sup>-1</sup>	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
$VZP_{milho,press}$	Vazão unitária de projeto para a cultura do milho sob o sistema de irrigação pressurizado	Contínua	l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup>	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
$VZP_{feijão,press}$	Vazão unitária de projeto para a cultura do feijão sob o sistema de irrigação pressurizado	Contínua	l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup>	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
$VZP_{arroz,sup}$	Vazão unitária de projeto para a cultura do arroz sob o sistema de irrigação pressurizado	Contínua	l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup>	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
$VZP_{cana,press}$	Vazão unitária de projeto para a cultura da cana-de-açúcar	Contínua	l.s <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup>	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
	sob o sistema de irrigação pressurizado						
DeCmilho	Decêncio de plantio ideal para dimensionamento de vazão de projeto para a cultura do milho, segundo modelo climático	Categórica	Decêndio do ano	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
DeCreijão	Decêncio de plantio ideal para dimensionamento de vazão de projeto para a cultura do feijão, segundo modelo climático	Categórica	Decêndio do ano	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
DeCarroz	Decêncio de plantio ideal para dimensionamento de vazão de projeto para a cultura do arroz, segundo modelo climático	Categórica	Decêndio do ano	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
DeCcana	Decêncio de plantio ideal para dimensionamento de vazão de projeto para a cultura da cana-de-açúcar, segundo modelo climático	Categórica	Decêndio do ano	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
ISNACmilho	Índice de satisfação à necessidade de água crítico para a cultura do milho	Contínua	adimensional	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
ISNACfeijão	Índice de satisfação à necessidade de água crítico para a cultura do feijão	Contínua	adimensional	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
ISNACarroz	Índice de satisfação à necessidade de água crítico para a cultura do arroz	Contínua	adimensional	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
ISNACcana	Índice de satisfação à necessidade de água crítico para a cultura da cana-de-açúcar	Contínua	adimensional	Raster	0.25° (graus)	GPP/USP e ANA	output
Mapbiomas 4.1	Mapa de uso da terra coleção 4.1 mapbiomas	Categórica	--	Raster	30m	Mapbiomas, 2020	input
SOS pantanal	Mapa de uso da terra SOS pantanal	Categórica	--	Raster	30m	SOS Pantanal, ArcPlan	input

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
Soja	Mapeamento de soja do bioma cerrado e Amazônia	Categórica	--	Raster	30m	Agrosatélite	input
Cana	Canasat	Categórica	--	Raster	30m	INPE/ Agrosatélite	input
Arroz	Áreas de cultivo de arroz	Categórica	--	Raster	30m	CONAB e ANA (2020)	input
Pivôs	Mapeamento dos pivôs centrais	Categórica	--	Vetor	1:250000	ANA	input
APP	Áreas de APP	Categórica	--	Raster	30m	GeoLab/USP	input
Profundidade do solo	Probabilidade de ocorrência de horizonte R dentro de 200 cm de profundidade (%)	Contínua	--	Raster	250m	SoiGrids v1.0	input
Drenagem do solo	Tempo de permanência da água no solo estimado pela classe taxonômica WRB	Categórica	5 classes	Raster	250m	SoiGrids v1.0	input
Textura do solo	Proporção relativa de argila no solo	Contínua	%	Raster	250m	SoiGrids v1.0	input
Capacidade de troca de cátions	Potencial de retenção de cátions no solo	Contínua	cmolc kg <sup>-1</sup>	Raster	250m	SoiGrids v1.0	input
Acidez subsuperficial	Classe de acidez subsuperficial definido por pH < 5 e baixa saturação por bases	Categórica	5 classes	Raster	250m	SoiGrids v1.0	input
IQS	Índice de qualidade do solo	Contínua	0-100	Raster	250m	GPP/USP	output
IQScat	Categorização do IQS	Categórica	5 classes	Raster	250mm	GPP/USP	output
Elevação	Modelo digital de elevação	Contínua	M	Raster	30m	STRM 30m	input
Declividade	Valor de declividade	Contínua	%	Raster	30m	GPP/USP	input
IQR	Índice de qualidade do relevo	Contínua	0-100	Raster	30m	GPP/USP	output

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
IQRcat	Categorização do IQR	Categórica	5 classes	Raster	30m	GPP/USP	output
ISNA <sub>referencia</sub>	ISNA calculado para a cultura de referencia	Contínua	0-100	Raster	250m	GPP/USP	output
IQC	Índice de qualidade do clima	Contínua	0-100	Raster	30m	GPP/USP	output
IQCcat	Categorização do IQC	Categórica	5 classes	Raster	30m	GPP/USP	output
IACSR	Índice de aptidão de meio físico (clima-solo-relevo)	Contínua	0-100	Raster	30m	GPP/USP	output
IACSRcat	Índice de aptidão de meio físico (clima-solo-relevo)	Categórica	5 classes	Raster	30m	GPP/USP	output
IASR	Índice de aptidão de meio físico (solo-relevo)	Contínua	0-100	Raster	30m	GPP/USP	output
IASRcat	Índice de aptidão de meio físico (solo-relevo)	Categórica	5 classes	Raster	30m	GPP/USP	output
Capacidade de armazenamento	Capacidade de armazenamento	Contínua	t	Vetor	Municipal	GPP/USP	Input
Índice de qualidade de armazenamento	Índice de qualidade de armazenamento	Contínua	0-100	Vetor	Municipal	GPP/USP	Output
Redes de distribuição de média tensão	Proximidade às redes de energia de média tensão	Contínua	m	Raster	250m	Concessionários ANEEL, GeoLab/USP	Input
Redes de distribuição de alta tensão	Proximidade às redes de energia de alta tensão	Contínua	m	Raster	250m	Concessionários ANEEL, GPP/USP	Input
Localização das subestações	Proximidade às subestações	Contínua	m	Raster	250m	ONS, GGP/USP	Input
Índice de qualidade de energia	Índice de qualidade de energia	Contínua	0-100	Raster	250m	GPP/USP	Output
Modais de transporte rodoviário e ferroviário	Proximidade aos modais de transporte rodoviário e ferroviário	Contínua	m	Raster	250m	DNIT, IBGE, GPP/USP	Input
Índice de qualidade de transporte	Índice de qualidade de transporte	Contínua	0-100	Raster	250m	GPP/USP	Output

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
Índice de qualidade de infraestrutura	Índice de qualidade de infraestrutura combinando energia, transporte e armazenamento	Contínua	0-100	Raster	250m	GPP/USP	Output
Índice de aptidão agrícola e infraestrutura (IAI)	Índice de aptidão agrícola e infraestrutura, combinando aptidão solo e relevo com infraestrutura (energia, transporte e armazenamento)	Contínua	0-100	Raster	30m	GPP/USP	Output
IAIcat	Índice de aptidão agrícola e infraestrutura, combinando aptidão solo e relevo com infraestrutura (energia, transporte e armazenamento) categorizado	Categórica	3 classes	Raster	30m	GPP/USP	Output
Concentração de pobreza	Concentração de pobreza no meio rural	Categórica	3 classes	Vetor	Municipal	GeoLab/USP	Output
Caracterização rural	Integração do IAIcat com a concentração de pobreza	Categórica	4 classes	Vetor	Municipal	GPP/USP	Output
cr	Área de agricultura por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
nv	Área de vegetação natural por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
pas	Área de pastagem por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
água	Área de massas d'água por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
nveg	Área não vegetada por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
silvi	Área de silvicultura por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
pivos	Área de pivôs centrais por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
soja	Área de soja por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
cana	Área de cana-de-açúcar por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
arroz	Área de arroz por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
cr_agtvl	Área agricultável de agricultura por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
pas_agtvl	Área agricultável de pastagem por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
vzp_cr	Vazão unitária de projeto média para a microbacia em áreas de agricultura	Contínua	$l.s^{-1}.ha^{-1}$	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
vzp_pa	Vazão unitária de projeto média para a microbacia em áreas de pastagem	Contínua	$l.s^{-1}.ha^{-1}$	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
area_ha	Área da microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	ANA	input
area_irr	Área irrigada da microbacia	Numérica	hectares	Tabular	microbacia	ANA	Input
cr_agtvl_disp	Área agricultável de agricultura descontada das áreas irrigadas atualmente por microbacia	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
dem_pa	Demanda hídrica total estimada para áreas de pastagem por microbacia	Contínua	$m^3.s^{-1}$	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
dem_cr	Demanda hídrica total estimada para áreas agrícolas por microbacia	Contínua	$m^3.s^{-1}$	Vetor	microbacia	GPP/USP	output

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
ret_humUrb	Vazão de retirada para usos urbanos projetada para 2030 (m <sup>3</sup> /s)	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	ANA	input
ret_humRur	Vazão de retirada para usos rurais projetada para 2030 (m <sup>3</sup> /s)	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	ANA	input
ret_industr	Vazão de retirada para usos industriais projetada para 2030 (m <sup>3</sup> /s)	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	ANA	input
ret_minera	Vazão de retirada para mineração projetada para 2030 (m <sup>3</sup> /s)	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	ANA	input
ret_animal	Retirada para dessedentação animal projetada para 2030 (m <sup>3</sup> /s)	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	ANA	input
ret_irriga	Retirada para irrigação 2020 (m <sup>3</sup> /s)	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	ANA	input
ret_total	Retirada total usada no modelo(m <sup>3</sup> /s)	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	ANA	input
PC_BalQ95_1	Nível de comprometimento pelos usos consuntivos	Contínua	%	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
DISPQ95_d1	Disponibilidade hídrica Q95 após desconto pelos usos consuntivos	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
PC_BalQ95_2	Nível de comprometimento pelos usos consuntivos e demandas para irrigação de áreas agrícolas	Contínua	%	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
DISPQ95_d2	Disponibilidade hídrica Q95 após desconto pelos usos consuntivos e áreas de intensificação da agricultura irrigada	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
PC_BalQ95_3	Nível de comprometimento pelos usos consuntivos, demandas para irrigação de	Contínua	%	Vetor	microbacia	GPP/USP	output

Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
	áreas agrícolas e demandas para irrigação de áreas de pastagem						
AAI_intensificacao	Área adicional irrigável de intensificação	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
AAI_expansao	Área adicional irrigável de expansão	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
Disp_sub	Disponibilidade hídrica subterrânea	Contínua	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Vetor	microbacia	GPP/USP	input
A_rem	Áreas agricultáveis totais remanescentes após desconto pelas áreas adicionais irrigáveis de intensificação e expansão	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
AAI_sub	Área adicional irrigável por meio de águas subterrâneas	Contínua	hectares	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
AP_infraestrutura	Classificação do indicador de infraestrutura para identificação de áreas prioritárias à irrigação	Categórica	Alta, média, baixa	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
AP_area_irrigada	Classificação da área irrigada atual para identificação de áreas prioritárias à irrigação	Categórica	Ausente, presente	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
AP_aai_agricultura	Classificação da AAI intensificação (agricultura de sequeiro) para identificação de áreas prioritárias à irrigação	Categórica	Alta, baixa	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
AP_aai_pastagem	Classificação da AAI expansão (pastagem) para identificação de áreas prioritárias à irrigação	Categórica	Alta, baixa	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
AP_aptidao_SR	Classificação da aptidão do meio físico para identificação de áreas prioritárias à irrigação	Categórica	Alta, média, baixa	Vetor	microbacia	GPP/USP	output
AP_classes_MDR_ANA	Classificação de área prioritárias para agricultura irrigada	Categórica	Desenvolvimento,	Vetor	microbacia	GPP/USP	output



Variável	Descrição	Tipo de Variável	Unidade	Formato do dado	Nível de detalhamento	Origem	Input/Output
AP_classes_agricultura_irrigada	Classificação de área prioritárias para agricultura irrigada	Categórica	Intensificação, Expansão, Desenvolvimento, Reserva técnica, Manutenção, Outras estratégias	Vetor	microbacia	GPP/USP	output

## ANEXO 2 – MODELO DE APTIDÃO AGRÍCOLA

**Quadro 6.** Classificação taxonômica (WRB/FAO, 2014) fornecida pelo mapa do *SoilGrids*, correlação com o sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS, 2018), breve descrição da classe taxonômica, e classe de aptidão agrícola considerando a drenagem.

WRB/FAO (2014)	SiBCS (2018)	Descrição básica	Aptidão
<b>Acrisols: Haplic Acrisols, Haplic Acrisols (Alumic), Haplic Acrisols (Ferric), Plinthic Acrisols</b>	Argissolos	Solos com gradiente textural, argila Tb, V% baixo	Média
<b>Alisols: Haplic Alisols</b>	Argissolos	Solos com gradiente textural, argila Ta, V% baixo	Média
<b>Andosols: Aluandic Andosols, Vitric Andosols</b>	-	Solos com acúmulo de materiais piroclásticos ou complexos organominerais, sem restrições de drenagem	Alta
<b>Arenosols: Albic Arenosols, Ferralic Arenosols, Haplic Arenosols, Hypoluvic Arenosols, Protic Arenosols</b>	Neossolo Quartzarênico	Solos bem arenosos, sem estrutura	Muito alta
<b>Calcisols: Haplic Calcisols</b>	-	Solos com alto teor de carbonatos	Média
<b>Cambisols: Haplic Cambisols, Haplic Cambisols (Calcaric), Haplic Cambisols (Chromic), Haplic Cambisols (Dystric), Haplic Cambisols (Eutric), Haplic Cambisols (Humic), Vertic Cambisols</b>	Cambissolos	Solos incipientes	Média
<b>Chernozems: Calcic Chernozems, Luvic Chernozems</b>	Chernossolos	Solos com alto teor de matéria orgânica e carbonatos, V% alto	Média
<b>Ferralsols: Acric Ferralsols, Haplic Ferralsols, Haplic Ferralsols (Rhodic), Haplic Ferralsols (Xanthic), Umbric Ferralsols</b>	Latossolos	Solos profundos, estruturados e bem drenados	Muito alta
<b>Fluvisols: Haplic Fluvisols, Haplic Fluvisols (Calcaric), Haplic Fluvisols (Dystric), Haplic Fluvisols (Eutric)</b>	Neossolos Flúvicos	Solos situados próximos à rios	Baixa
<b>Gleysols: Haplic Gleysols, Haplic Gleysols (Dystric), Haplic Gleysols (Eutric), Mollic Gleysols, Umbric Gleysols</b>	Gleissolos	Solos mal ou imperfeitamente drenados	Muito baixa
<b>Histosols: Fibric Histosols, Hemic Histosols</b>	Organossolos	Solos com alto teor de matéria orgânica, geralmente associados a	Muito baixa

WRB/FAO (2014)	SiBCS (2018)	Descrição básica	Aptidão
		regiões mal drenadas ou de importância ambiental	
<b>Kastanozems: Calcic Kastanozems</b>	Chernossolos	Solos com alto teor de carbonatos	Média
<b>Leptosols: Haplic Leptosols, Haplic Leptosols (Eutric), Lithic Leptosols, Mollic Leptosols, Rendzic Leptosols</b>	Neossolos litólitos	Solos mal desenvolvidos	Baixa
<b>Lixisols: Haplic Lixisols, Haplic Lixisols (Chromic), Haplic Lixisols (Ferric)</b>	Nitossolos	Solos com gradiente textural, argila Tb, V% alto	Média
<b>Luvisols: Calcic Luvisols, Haplic Luvisols, Haplic Luvisols (Chromic), Haplic Luvisols (Ferric), Leptic Luvisols, Stagnic Luvisols, Vertic Luvisols</b>	Luvisolos	Solos com gradiente textural, argila Ta, V% alto	Média
<b>Nitisols: Alic Nitisols, Haplic Nitisols (Rhodic)</b>	Nitossolos	Solos profundos, bem estruturados, mas com leve acúmulo subsuperficial de argila	Alta
<b>Phaeozems: Haplic Phaeozems, Luvic Phaeozems</b>	Chernossolos	Solos com alto teor de carbonatos	Média
<b>Planosols: Haplic Planosols (Dystric), Haplic Planosols (Eutric), Solodic Planosols</b>	Planossolos	Solos com gradiente textural com problema de drenagem	Baixa
<b>Plinthosols: Acric Plinthosols, Lixic Plinthosols</b>	Plintossolos	Solos com acúmulo de plintita ou petroplintica, causando impedimento físico	Baixa
<b>Podzols: Gleyic Podzols, Haplic Podzols</b>	Espodossolos	Solos com horizonte espódico, bem drenados	Alta
<b>Regosols: Aric Regosols, Haplic Regosols (Dystric), Haplic Regosols (Eutric)</b>	Neossolos Regolíticos	Solos pouco desenvolvidos	Baixa
<b>Solonchaks: Haplic Solonchaks</b>	Gleissolos Nátricos	Solos com alto acúmulo de sais e mal drenados	Muito Baixa
<b>Solonetz: Calcic Solonetz, Gleyic Solonetz, Haplic Solonetz, Mollic Solonetz</b>	Planossolos Nátricos	Solos com alto acúmulo de sódio e gradiente textural	Baixa
<b>Vertisols: Calcic Vertisols, Haplic Vertisols, Haplic Vertisols (Eutric)</b>	Vertissolos	Solos com gradiente textural	Média

### **Cálculo do Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA)**

Para o cálculo do Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA), é preciso, previamente, realizar o cálculo de outras variáveis auxiliares descritas (i) pelo método combinado FAO Penman-Monteith, descrito em Allen et al. (1998), para cálculo de Evapotranspiração potencial (ETP); e (ii) pelo método do BHC de Thornthwaite & Mather (1955) para cálculo da evapotranspiração real (ETR). A partir da relação entre as duas variáveis secundárias, calcula-se a evapotranspiração relativa ETr em escala diária, dada por:

$$ETr = \frac{ETR}{ETP}$$

Para a configuração do conceito de ISNA, concatena-se a evapotranspiração relativa em períodos representativos, no caso, as fases fenológicas da cultura em questão, de modo a condensar a resolução temporal (um valor para cada dia do ciclo) em quatro indicadores, um para cada fase fenológica distinta, sendo elas: estabelecimento ( $p = 1$ ), desenvolvimento vegetativo ( $p = 2$ ), florescimento ou inversão de drenos ( $p = 3$ ) e maturação fisiológica ( $p = 4$ ). Em cada uma delas, é utilizada a fórmula abaixo:

$$ISNA_p = \frac{\sum_{m=a}^b ETR_p}{\sum_{m=a}^b ETP_p}$$

Onde  $a$  é o limite inferior e  $b$  é o limite superior dos dias após a semeadura ( $m$ ) no intervalo que compreende a fase fenológica  $p$ .

A definição das fases fenológicas, duração do ciclo e coeficientes de cultura ( $Kc$ ) se baseou na cultura do Milho, que foi nomeado como ciclo de cultura referência. A **Tabela 14** aponta os limites adotados para as simulações a fim de ilustrar a parametrização do cálculo do índice para cada fase.

**Tabela 14.** Índice limites das fases fenológicas para cultura genérica e seus respectivos coeficientes de cultura ( $Kc$ )

	$ISNA_1$	$ISNA_2$	$ISNA_3$	$ISNA_4$
	Estabelecimento	Desenvolvimento vegetativo	Florescimento ou inversão de drenos	Maturação fisiológica
$p$	1	2	3	4
Início (DAS)	$a=0$	$a=30$	$a=70$	$A=120$
Fim (DAS)	$b=30$	$b=70$	$b=120$	$b=150$
$Kc$	0.7	0.7 – 1.15	1.15	1.15 – 0.6

Onde,

$$ISNA_1 = \frac{\sum_{m=0}^{30} ET r_1}{\sum_{m=0}^{30} ET c_1}$$

$$ISNA_2 = \frac{\sum_{m=30}^{70} ET r_2}{\sum_{m=30}^{70} ET c_2}$$

$$ISNA_3 = \frac{\sum_{m=70}^{120} ET r_3}{\sum_{m=70}^{120} ET c_3}$$

$$ISNA_4 = \frac{\sum_{m=120}^{150} ET r_4}{\sum_{m=120}^{150} ET c_4}$$

Uma vez obtidos o  $ISNA_1$ ,  $ISNA_2$ ,  $ISNA_3$  e  $ISNA_4$ , a média geométrica é calculada a partir dos três primeiros a fim de se obter um índice único que possa representar o ISNA do ciclo total, e que leve em conta as variações extremas apresentadas por cada um de seus componentes. Vale pontuar, que são tomados apenas os três primeiros, ( $ISNA_1$ ,  $ISNA_2$  e  $ISNA_3$ ) pois são representantes dos períodos fenológicos altamente susceptíveis à déficit hídrico, diferentemente do  $ISNA_4$ , que não fora incluso por refletir o período em que a planta está em maturação fisiológica, e a produtividade já não sofre perdas significativas pela restrição hídrica.

Para o cálculo da média geométrica, tem-se:

$$ISNA = \sqrt[3]{\prod_{p=1}^3 ISNA_p}$$

a qual representa o produto entre os elementos que vão de 1 a 3, tornando, portanto, a média geométrica dos ISNA referente aos três estágios fenológicos ( $p = 1$ ,  $p = 2$  e  $p = 3$ ).

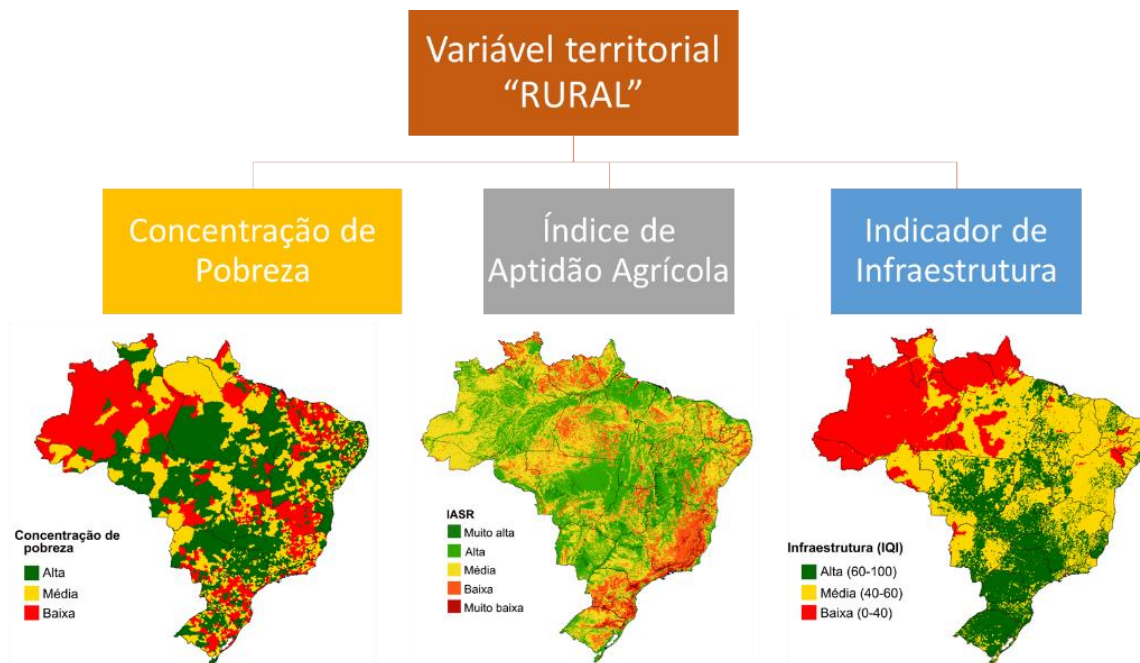
Para a aplicação do método de estimativa do ISNA, é necessário realizar o BHC sequencial de Thornthwaite & Mather (1955). Porém, para isso, é preciso definir uma data de semeadura, e só assim, dar início à simulação. Esta data é de suma importância e deve ser calculada para cada ponto do território, de acordo com o método de avaliação do Índice de Satisfação à Necessidade de Água **CRÍTICO**, ou ISNA crítico.

## ANEXO III – CLASSES DE CARACTERIZAÇÃO RURAL

A finalidade deste capítulo é apresentar os resultados da combinação complexa das variáveis de caracterização do meio rural geradas no âmbito do presente estudo. A combinação de variáveis de caracterização rural tem como objetivo gerar classes territoriais que reflitam atributos como: (i) o grau de concentração de estabelecimentos rurais com baixa renda; (ii) a aptidão agrícola como expressão dos principais atributos do meio físico para a produção agropecuária; e (iii) a disponibilidade de infraestrutura existente no espaço rural que pode, eventualmente, potencializar ou restringir o desenvolvimento da agropecuária.

Para a composição das classes de caracterização rural, portanto, três elementos foram considerados, os quais são ilustrados pela **Figura 60**, a saber: (i) concentração de pobreza no meio rural; (iii) aptidão física (solo, clima e relevo); e (iv) indicador de infraestrutura (modais de transporte, armazenamento e anergia elétrica). Esses elementos são a seguir sintetizados na forma de variáveis.

**Figura 60.** Representação esquemática do cruzamento das variáveis utilizadas para a obtenção das Classes Territoriais Rurais



Os **Quadros 7 e 8** apresentam, respectivamente: (i) a lógica compreendida na obtenção das **Classes Territoriais Rurais**; e (ii) a conceituação das quatro classes territoriais rural geradas: **estável, independente, alterável e apoiada**.

**Quadro 7.** Lógica de combinação das variáveis utilizadas para a obtenção das Classes Territoriais Rurais

	Concentração de Pobreza	Índice de Aptidão Agrícola e Indicador de Infraestrutura (Iai)	Classe Territorial Rural
<b>RESUMO DA VARIÁVEL</b>	Nível de desenvolvimento socioeconômico de cada município brasileiro, levando em conta a quantidade de estabelecimentos mais pobres no meio rural (Censo 2017)	Aptidão do meio físico combinada à disponibilidade de infraestrutura (estradas) para avaliar o potencial de desempenho da produção agropecuária	A aptidão e desenvolvimento são eixos principais na configuração das classes territoriais e o interesse ambiental e a dinâmica fundiária constituem eixos secundários que modulam a orientação das intervenções
<b>CLASSES GERADAS</b>	Alto	Alto ou Médio	Estável
		Baixo	Independente
	Médio ou Baixo	Alto ou Médio	Alterável
		Baixo	Apoiada
	Alto	Alto ou Médio	Estável
		Baixo	Independente
	Médio ou Baixo	Alto ou Médio	Alterável
		Baixo	Apoiada
	Alto	Alto ou Médio	Estável
		Baixo	Independente
	Médio ou Baixo	Alto ou Médio	Alterável
		Baixo	Apoiada

**Quadro 8.** Classes territoriais e conceito das condições relacionadas ao nível de desenvolvimento e de aptidão

Classes territoriais rurais	Conceito
<b>Estável</b>	<p><b>Alto Índice de Aptidão Agrícola e Indicador de Infraestrutura (IAI), Alta concentração de pobreza (“<i>Já deu certo</i>”):</b> a combinação de alto IAI com alto desenvolvimento aponta para um cenário em que há a presença de boas condições físicas (solo, clima, relevo), de boa infraestrutura para escoamento de produção e desenvolvimento de sistemas irrigados (distâncias de rodovias). Essas combinações alinham-se a uma situação de reduzida pobreza no meio rural, em um processo sinérgico de promoção do desenvolvimento econômico e social. A orientação sustentável ou orientação produtiva subdividem a classe. No caso de interesse ambiental extremo, os sistemas de produção e a continuidade do desenvolvimento agropecuário devem orientar suas ações, de modo a preservar o solo, água e a biodiversidade, contribuindo para sua melhoria constante. A sustentabilidade e o baixo impacto ambiental devem ser considerados como norteadores de qualquer intervenção pública ou privada. Estas características definem a situação estável com orientação sustentável. A situação estável na qual não ocorre interesse de conservação extremo assume papel estratégico na produção, opção que nesses territórios deve ser priorizada. A combinação destes fatores é uma oportunidade para a intensificação da produção e promoção da agropecuária com reduzido impacto ambiental, e sem preocupação especial com indutores de desenvolvimento, necessidade de alteração de matriz fundiária ou conduta especial decorrente da relevância ambiental. A orientação produtiva deve nortear a intervenção pública e a promoção de infraestrutura visando aproveitar ao máximo o potencial destas áreas em sistemas de produção tradicionais, altamente produtivos e intensivos.</p>



Classes territoriais rurais	Conceito
Alterável	<p><b>Alto Índice de Aptidão Agrícola e Infraestrutura Viária (IAI), Baixo desenvolvimento (“Precisa mudar”):</b> combinação de baixo desenvolvimento municipal com elevado IAI. Caracteriza situação na qual, apesar das boas condições para se produzir, ou seja, boa disponibilidade de infraestrutura e boa qualidade do meio físico, as matrizes fundiárias e produtivas estabelecidas não promovem a redução da extrema pobreza rural regional. Intervenções devem ser feitas no sentido de ampliar a importância do produtor familiar ou qualificar a atuação de médios e grandes produtores, possibilitando a melhor exploração das boas condições físicas e de infraestrutura existentes. Esta dinamização deve seguir um caminho sustentável no caso da associação com áreas de extremo interesse de conservação. Neste caso, a questão ambiental deve indicar os sistemas de produção priorizados e contar com orientação e suporte técnico específico. Quando não associada a áreas de extremo interesse de conservação a dinamização deve se dar na direção produtiva, procurando tirar o maior proveito possível das boas condições físicas.</p>
Apoiada	<p><b>Baixo Índice de Aptidão Agrícola e Infraestrutura Viária (IAI), Baixo desenvolvimento (“Precisa ajudar”):</b> combinação de baixo desenvolvimento municipal com baixo IAI, em qualquer situação de densidade fundiária. Devido à situação em que a extrema pobreza rural é preponderante e exige ações contundentes, os sistemas de produção existentes devem ser apoiados, visando assim contribuir com a melhoria das condições da população rural através do fortalecimento da agricultura. Agricultores inseridos nesta categoria, nas mais diversas cadeias de atuação, muito possivelmente apresentam baixa rentabilidade, baixa capacidade de acesso ao crédito rural e não há um padrão tecnológico estabelecido. O apoio deve ser amplo, visando não só a adaptação dos sistemas produtivos a condições físicas restritivas, como também a priorização de redes comerciais diferenciadas e infraestrutura adequada. A reversão do quadro de concentração de extrema pobreza rural pode exigir ações governamentais concentradas, envolvendo uma gama maior de intervenções. A orientação sustentável é outra prerrogativa que deve ser seguida na sua associação com áreas de extremo interesse de conservação ambiental. Não existindo esta condição, a adaptação produtiva será necessária.</p>
Independente	<p><b>Baixo Índice de Aptidão Agrícola e Infraestrutura Viária (IAI), Alto desenvolvimento (“Precisa entender”):</b> combinação de alto desenvolvimento municipal com baixo IAI. Situação na qual a produção agropecuária se sobressai e serve como um modelo para as demais</p>

Classes territoriais rurais	Conceito
	<p>regiões, uma vez que apresenta reduzida pobreza regional – pois não segue o padrão comum de depender de boa aptidão para seu desempenho, ou seja, mesmo com condições ruins de meio físico (solo, clima, relevo), de infraestrutura para escoamento de produção e para desenvolvimento de sistemas irrigados (distâncias de rodovias), o desenvolvimento rural alcança elevado patamar. Esta condição especial pode ter se dado pela industrialização local da produção e conseqüentemente, pela agregação de valor, exploração de sistemas produtivos que independem dos fatores considerados na definição das classes de aptidão agrícola, atuação em nichos de mercado, ou sistemas de produção muito intensivos. Não é esperado que sistemas de produção convencionais, dependentes de boas condições físicas, se adaptem às restrições existentes e auxiliem no desenvolvimento regional. Por isto deve haver especificidade e adaptação nas ações públicas ou privadas nesta classe. A especificidade ambiental ocorre na associação com interesse em conservação ambiental extremo. Além de respeitar as restrições de aptidão do meio físico, priorizando apenas os arranjos que independem de boas condições para sistemas convencionais, o interesse ambiental exige intervenções que também sejam compatíveis com o elevado valor de conservação destas áreas. As restrições físicas e a condição especial do ponto de vista ambiental atribuem caráter muito específico às intervenções e estratégias de desenvolvimento territorial que não devem seguir padrões convencionais. Em locais onde a classe se associa a uma condição ambiental na qual não há interesse extremo em relação à biodiversidade ou conservação, permanecem as restrições físicas de solo, clima ou topografia, o que gera a necessidade de adaptação produtiva dos sistemas implementados. Os padrões convencionais de produção não devem ser incentivados.</p>

As variáveis aptidão agrícola e indicador logístico foram descritas no capítulo 2 deste documento, a seguir, complementarmente, é apresentado a variável de concentração de pobreza e na sequência os procedimentos de como as informações foram combinadas para gerar as classes de caracterização rural.

### **a) Concentração de pobreza**

A concentração de pobreza representa o nível de desenvolvimento socioeconômico rural de cada município brasileiro, obtido com base no Censo Agropecuário de 2017. Este indicador foi desenvolvido por Sparovek et al. (2013)<sup>28</sup>, seguindo a categorização dos estabelecimentos rurais conforme a renda bruta proposta por Alves et al. (2010)<sup>29</sup>: (i) maior que zero e até 2 salários mínimos mensais: Categoria Muito Pobres; (ii) maior que 2 e até 10 salários mínimos mensais: Categoria Pobres; (iii) maior que 10 e até 200 salários mínimos mensais: Categoria Classe Média e (iv) maior que 200 salários mínimos mensais: Categoria Ricos. O cálculo da variável obedece à seguinte sequência de operações: (i) os municípios de cada uma das 5 regiões brasileiras são ranqueados em ordem decrescente de porcentagem de estabelecimentos muito pobres; (ii) para cada região separadamente, e, seguindo a ordem ranqueada, os municípios que acumularam até 1/3 do total de estabelecimentos muito pobres são categorizados como de concentração alta; (iii) para cada região separadamente, e, seguindo a ordem ranqueada, os municípios que acumularam de 1/3 a 2/3 de estabelecimentos muito pobres são categorizados como de concentração médio; e, (iv) para cada região separadamente, e, seguindo a ordem ranqueada, os municípios que acumularam acima de 2/3 do total dos estabelecimentos muito pobres são categorizados como de concentração baixa.

Para o presente estudo, as classes de renda foram obtidas a partir do recorte específico de dados sobre a variável Valor Bruto de Produção (VBP) disponibilizados no banco de dados agregados do IBGE. Considerou-se a soma do número de

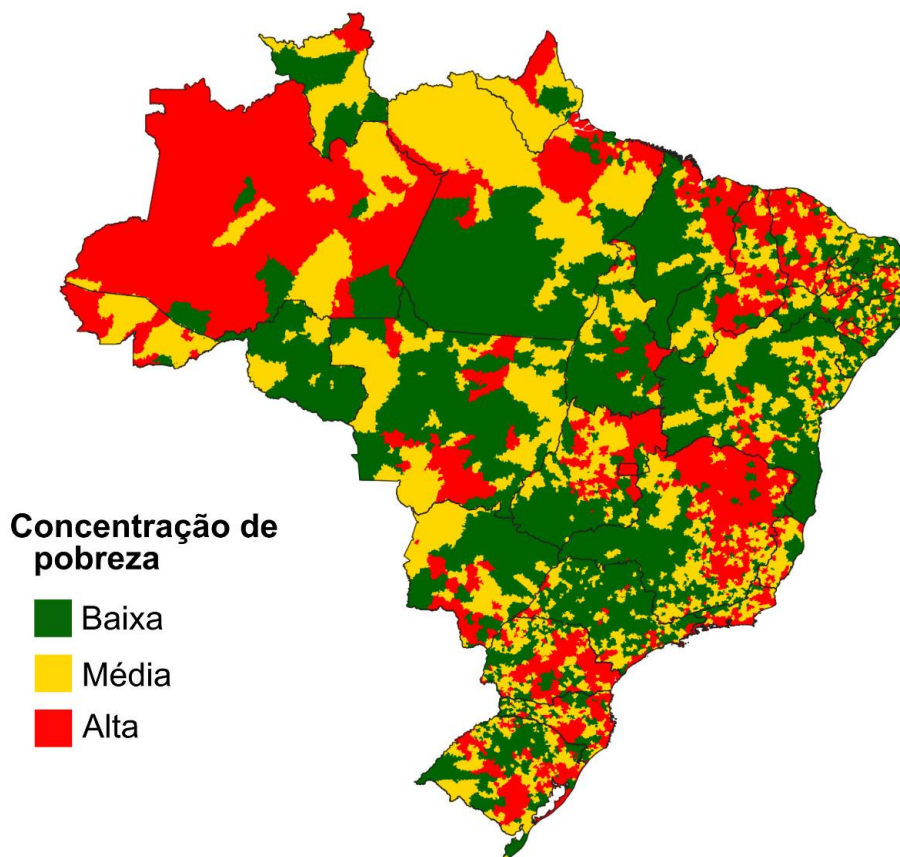
---

<sup>28</sup> Sparovek, G.; Freitas, F.L.M.; Maule, R.F.; Paganini, S.M. Análise territorial e políticas para o desenvolvimento agrário. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Agrário - NEAD estudos. 2013. Disponível em: <https://bit.ly/3eNVleQ>.

<sup>29</sup> Alves, Eliseu; Rocha, Daniela Paula. Ganhar Tempo é Possível? Em: Gasques, José Garcia; Filho, José Eustáquio Ribeiro Vieira; Navarro, Zander (organizadores). A Agricultura Brasileira: Desempenho, Desafios e Perspectivas. Brasília, IPEA. Cap. 11, p. 275-289, 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3hijSrJ>.

estabelecimentos agropecuários familiares e não familiares de até 100 hectares inseridos nas seguintes classes de valor de produção: (i) maior que 0 e menor que 5.000 reais; (ii) de 5.000 a menos de 10.000 reais; e (iii) de 10.000 a menos de 25.000 reais. Como o valor do salário mínimo em 2017 era R\$ 937,00, todos os estabelecimentos inseridos em tais classes de valor de produção apresentaram até 2,2 salários mínimos mensais. Portanto, este número fica próximo ao proposto por Alves et al. (2010), que foi de até 2 salários mínimos para a classe muito pobre (Figura 61).

**Figura 61.** Classes de concentração de pobreza para o território brasileiro.



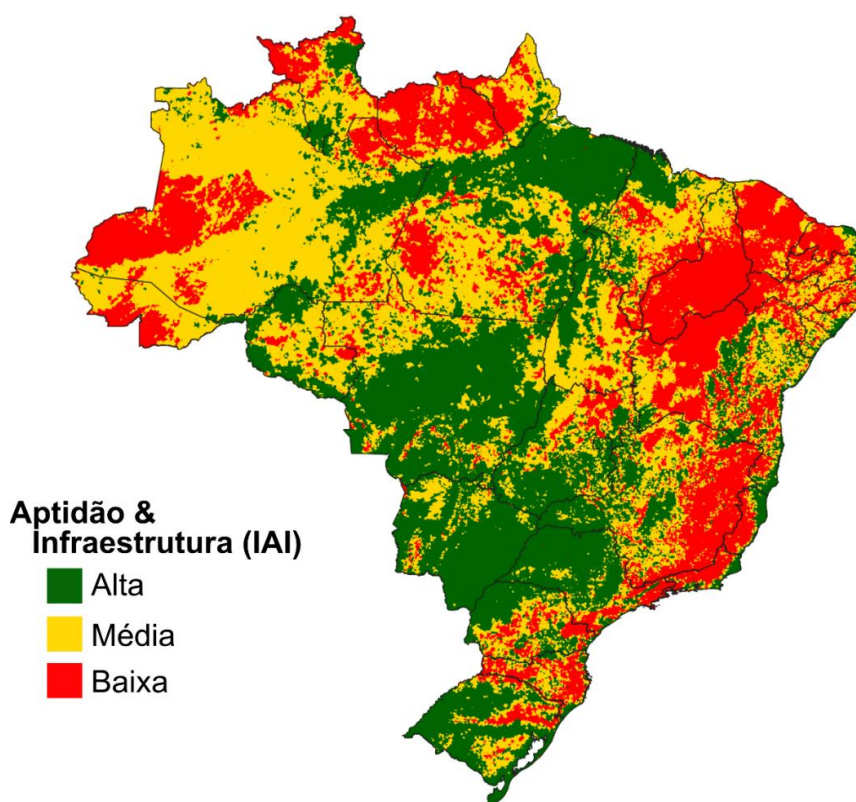
#### **b) Índice de aptidão agrícola e infraestrutura**

O cálculo do índice de aptidão agrícola e infraestrutura (IAI) se deu pela média aritmética ponderada dos valores contínuos da aptidão agrícola considerando o clima, solo e relevo (IAMF), junto com indicador de infraestrutura que considera os

componentes energia, transporte e armazenamento (IQI). A aptidão física, que é a capacidade do local fornecer as condições necessárias para o cultivo agrícola sob o ponto de vista do meio físico, foi considerada no cálculo com peso 2 porque apresenta maior dificuldade em ser melhorada pela ação do homem. Já a disponibilidade de infraestrutura, que é dinâmica ao longo do tempo e pode ser melhorada através de investimentos, foi considerada com peso 1 no cálculo (Equação 14). O resultado do IAI é representado na escala de 0 (sem aptidão) e 100 (alta aptidão), mas foi categorizado em três quantis para ser combinada com a concentração de pobreza e assim, produzir a caracterização rural (**Figura 62**).

$$IAI = (IAMF \times 2 + IQI \times 1) \div 3 \quad (26)$$

**Figura 62.** Índice de aptidão agrícola e infraestrutura (IAI) categorizado em três classes.



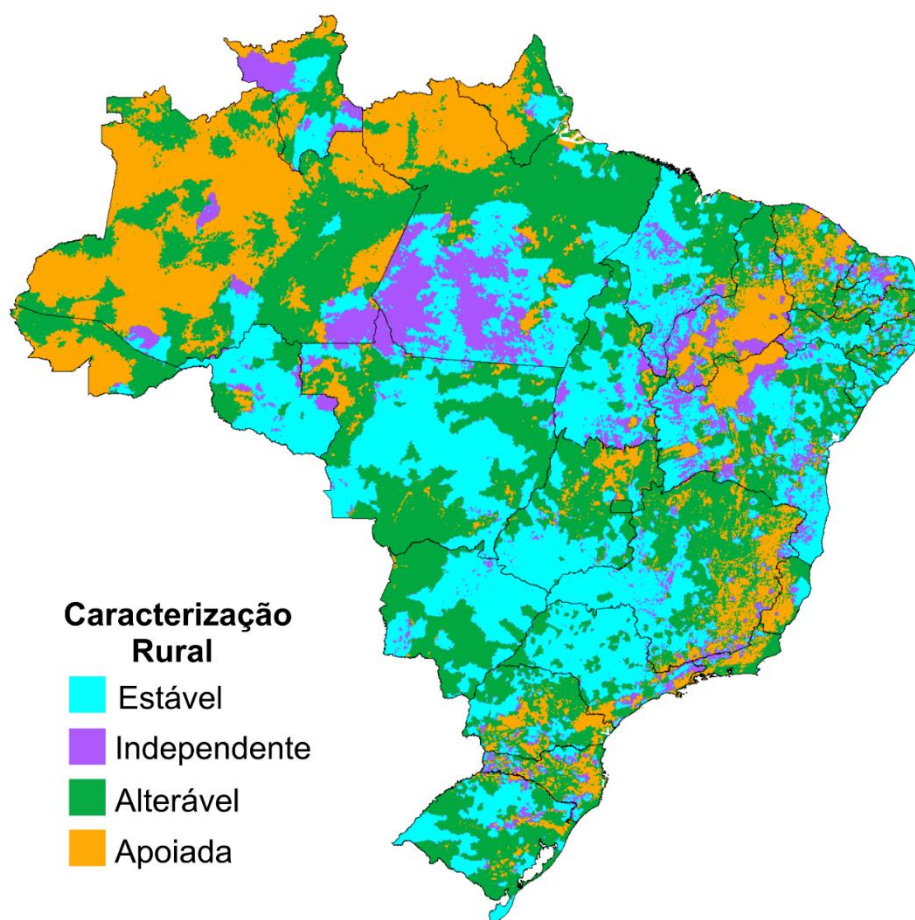
### b) Classes de Caracterização rural

Para a caracterização rural, os mapas categorizados do IAI e concentração de pobreza produzidos ao nível de microbacia foram combinados. A caracterização rural (CR) é obtida através de uma chave de interpretação, sintetizada no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e apresentada na **Figura 63**.

**Quadro 9.** Classes de caracterização rural (CR) resultantes da combinação entre concentração de pobreza (CP) e o índice de aptidão agrícola e infraestrutura (IAI).

	<b>CP</b>	<b>IAI</b>	<b>Classe de CR</b>
<b>Caracterização Rural</b>	Alto	Alto ou Médio Baixo	Estável Independente
	Médio ou Baixo	Alto ou Médio Baixo	Alterável Apoiada

**Figura 63.** Caraterização rural do território brasileiro.



## ANEXO IV - EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DE REFERÊNCIA SEGUNDO PENMAN-MONTEITH (ET<sub>o</sub> PADRÃO FAO)

### Introdução

A evapotranspiração potencial de referência (ET<sub>o</sub>, mm d<sup>-1</sup>) é um importante parâmetro em agricultura. A ET<sub>o</sub> reflete a resposta da espécie de referência, grama batatais (*Paspalum notatum*), em termos de evaporação e transpiração e, conseqüentemente, a quantidade de água (e nutrientes) absorvida e água incorporada na massa de matéria seca.

A evapotranspiração potencial da cultura de interesse (ET<sub>c</sub>, mm d<sup>-1</sup>) é estimada em função da ET<sub>o</sub> por intermédio da seguinte equação linear, cujo coeficiente angular é o coeficiente da cultura de interesse (K<sub>c</sub>) e o coeficiente linear é nulo:  $ET_c = K_c \cdot ET_o$ .

Sendo assim, diretamente ou indiretamente, a ET<sub>o</sub> é utilizada em modelos (determinísticos ou estocásticos considerando ou não análise territorial) de estimação da produtividade (ideal, potencial, atingível, real e máxima econômica) da parte exportável das culturas de interesse no Brasil (soja, milho, cana-de-açúcar, algodão, arroz, feijão, sorgo, trigo, eucalipto, pinus, flores, olerícolas e frutíferas, principalmente), realização de balanço hídrico (cíclico ou sequencial) e o zoneamento agrícola considerando os elementos do clima (temperatura, radiação fotossinteticamente ativa, insolação e fotoperíodo), dióxido de carbono, genótipo, disponibilidade de água e nutrientes, incidência de plantas daninhas, pragas e doenças, manejo (considerando o sistema de produção – irrigado ou sequeiro, semeadura direta ou convencional, p.e. - e a disponibilidade de capital, terra e mão-de-obra) e o risco climático.

O método proposto por Penman-Monteith, parametrizado pela FAO, é considerado o procedimento padrão para estimação da ET<sub>o</sub> (ALLEN et al., 1998), onde são necessários os seguintes dados: (i) saldo de radiação (R<sub>n</sub>, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), (ii) fluxo de calor no solo (G, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), (iii) velocidade do vento a 2 m de altura (U<sub>2</sub>, m s<sup>-1</sup>), (iv) temperatura do ar (T, °C) e (v) umidade relativa do ar (UR, %). Por outro lado, como nem sempre os dados estão disponíveis, há a necessidade de alternativas para estimar uma ou mais variáveis.

### Metodologia

#### Evapotranspiração potencial de referência

O método de Penman-Monteith, parametrizada pela FAO (PM-FAO56), para estimação de ET<sub>o</sub> é dado pela seguinte expressão (ALLEN et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0,508 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (27)$$

em que  $\Delta$  se refere à declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura (kPa°C<sup>-1</sup>), R<sub>n</sub> ao saldo de radiação diário (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), G ao fluxo total diário de calor no

solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $\gamma$  ao coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $U_2$  à velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  à pressão de saturação de vapor de água ( $\text{kPa}$ ),  $e_a$  à pressão atual de vapor de água ( $\text{kPa}$ ), e  $T$  à temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

No procedimento padrão de estimação de  $E_{To}$ , os valores de  $R_n$ ,  $G$ ,  $U_2$  e  $T$  são mensurados (dados de entrada) na estação agrometeorológica, e os valores de  $\Delta$  (calculado em função da temperatura),  $\gamma$  (calculado em função da pressão atmosférica local, que por sua vez é calculada em função da altitude),  $e_s$  (calculado em função da temperatura) e  $e_a$  (calculado em função da umidade relativa) são assim calculados:

(i) declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura ( $\Delta$ ,  $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ):

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left(0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T}{T+237,3}}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (1)$$

(ii) constante psicrométrica ( $\gamma$ ,  $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ):

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P_0}{\epsilon \cdot \lambda} = \frac{0,665}{1000} \cdot P_0 \quad (2)$$

em que  $C_p$  se refere ao calor específico a pressão constante ( $1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\epsilon$  à razão entre o peso molecular do vapor de água e o ar seco (0,622),  $\lambda$  ao calor latente de vaporização ( $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) e  $P_0$  à pressão atmosférica local ( $\text{kPa}$ ):

$$P_0 = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,065 \cdot A}{293}\right)^{5,26} \quad (3)$$

em que  $A$  se refere à altitude do local (m).

(iii) pressão de saturação de vapor de água ( $e_s$ ,  $\text{kPa}$ )

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T}{T+237,3}} \quad (4)$$

em que  $T$  se refere à temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

(iv) pressão atual de vapor de água ( $e_a$ ,  $\text{kPa}$ )

$$e_a = e_s \cdot \frac{UR}{100} \quad (5)$$

em que  $UR$  se refere ao valor observado de umidade relativa média do ar (%).

### Modelos alternativos

Os seguintes modelos alternativos foram desenvolvidos, em diferentes locais, para a estimação do(a): (i) saldo de radiação ( $R_n$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) (Tabela 1), (ii) fluxo de calor ( $G$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) no solo (Tabela 2), (iii) velocidade do vento ( $U_2$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) (Tabela 3), e (iv) radiação solar global ( $Q_g$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) (Tabelas 4 e 5).



**Tabela 15.** Estimação do saldo de radiação ( $R_n$ , MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) por modelos alternativos.

Caso	Região	Modelo	Fonte	Eq.
1	Qualquer região	Valor observado	Allen et al. (1998)	-
2	Qualquer região	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$	Allen et al. (1998)	(6)
3	Piracicaba (SP)	$R_n = 0,574 \cdot Qg$	Pereira et al. (1998)	(7)
4	Ilha Solteira (SP)	$R_n = 0,653 \cdot Qg$	Conceição (2006)	(8)

(Caso 1) A primeira opção é utilizar o valor observado do saldo de radiação.

(Caso 2) O saldo de radiação pode assim ser estimado considerando o saldo de radiação de ondas curtas e o saldo de radiação de ondas longas, bem como a constante de Stefan-Boltzmann, a radiação global, o coeficiente de reflexão (albedo), a temperatura máxima e mínima do dia, a radiação solar global máxima na ausência de nuvens, a pressão atual de vapor de água, a altitude, a radiação solar no topo da atmosfera, a latitude, a distância inversa relativa entre a Terra e o Sol, o número de ordem do dia do ano, a declinação solar e o ângulo horário ao nascer do sol.

(Casos 3 e 4)  $Qg$  se refere à radiação global (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

No caso 2 (Tabela 1), o saldo de radiação pode assim ser estimado:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (9)$$

em que  $R_{ns}$  (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) se refere ao saldo de radiação de ondas curtas:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot Qg \quad (10)$$

em que  $Qg$  à radiação global (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) medida na estação agrometeorológica,  $\alpha$  ao coeficiente de reflexão (albedo) da vegetação (0,23 para a cultura de referência - grama).

O saldo de radiação de ondas longas ( $R_{nl}$ , MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) pode assim ser estimado:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \beta \cdot \nabla \cdot \tau \quad (11)$$

$$\beta = \frac{(T_x + 273,16)^4 + (T_N + 273,16)^4}{2} \quad (12)$$

$$\nabla = 0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a} \quad (13)$$

$$\tau = 1,35 \cdot \frac{Qg}{Qg_x} - 0,35 \quad (14)$$

em que  $\sigma$  se refere à constante de Stefan-Boltzmann (4,903.10<sup>-9</sup> MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),  $T_x$  à temperatura máxima (°C) e  $T_N$  à mínima (°C) do dia,  $e_a$  à pressão atual de vapor de água (kPa),  $Qg/Qg_x$  à radiação global relativa limitada ao valor máximo unitário ( $0 \leq Qg/Qg_x \leq 1$ ) e  $Qg_x$  à radiação solar global máxima na ausência de nuvens (céu limpo) (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

O valor de  $Qg_x$  pode assim ser calculado:

(i) ao nível do mar, quando os parâmetros empíricos  $a_s$  e  $b_s$  são disponíveis:

$$Qg_x = (a_s + b_s) \cdot Q_0 \quad (15)$$

(ii) quando os parâmetros empíricos  $a_s$  e  $b_s$  são disponíveis:

$$Q_{g_x} = \left(0,75 + \frac{2}{10^5} \cdot A\right) \cdot Q_0 \quad (16)$$

em que A se refere à altitude (m) e  $Q_0$  à radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), assim calculada:

$$Q_0 = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{SC} \cdot d_r \cdot [w_s \cdot \text{sen}(\vartheta) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\vartheta) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(w_s)] \quad (17)$$

em que  $\vartheta$  se refere à latitude (rad) e  $G_{SC}$  à constante solar ( $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ) [ $24 \cdot (60) \cdot G_{SC} = 118,08 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ]. A distância inversa relativa entre a Terra e o Sol ( $d_r$ , rad) é assim calculada:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \left(\frac{2\pi}{365} \cdot j\right) \quad (18)$$

sendo j o número de ordem do dia do ano (de 1 a 365 - ou 366 para ano bissexto).

A declinação solar ( $\delta$ , rad) é dada por:

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} \cdot j - 1,39\right) \quad (19)$$

O ângulo horário ao nascer do sol ( $w_s$ , rad) é assim calculado:

$$w_s = \frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left[\frac{-\text{tg}(\vartheta) \cdot \text{tg}(\delta)}{\sqrt{1 - [\text{tg}(\vartheta)]^2 \cdot [\text{tg}(\delta)]^2}}\right] \quad (20)$$

**Tabela 16.** Estimação do fluxo de calor (G,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) no solo por modelos alternativos.

Caso	Região	Modelo	Fonte	Eq.
1	Qualquer região	Valor observado	Allen et al. (1998)	(21)
2	Qualquer região	$G = 0$	Allen et al. (1998)	(22)
3	Idaho, EUA	$G = (0,05 + 0,18 \cdot e^{-0,521 \cdot IAF}) \cdot R_n$	Tasumi (2003) e Trezza (2002)	(23)
4	Nebraska, EUA	$G = 0,41 \cdot R_n - 51$	Burba et al. (1999)	(24)
5	Indiana, EUA	$G = 0,53 \cdot R_n - 37,5$	Souch (1996)	(25)
6	Idaho, EUA	$G = [1,80 \cdot (T_s - 273,16) + 0,084] \cdot R_n$	Tasumi (2003) e Trezza (2002)	(26)

(Caso 1) A primeira opção é utilizar o valor observado do fluxo de calor (G,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) no solo.

(Caso 2) Estimações na escala diária, o fluxo de calor (G,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) no solo apresentam baixos valores.

(Caso 3) Superfícies úmidas com mensurações de meia em meia hora.

(Caso 4) Zonas úmidas do Indiana National Lakeshore com mensurações de hora em hora.

(Casos 5 e 6) Fluxo de calor no solo com dados de  $R_n$ , G e IAF medidos durante 4 anos (1971-1974) em campos de Alafa (1971), feijão (1973-74) e batata (1972) em Kimberly, Idaho, em superfícies vegetadas (Caso 5) e solo nu (caso 6).

**Tabela 17.** Estimação da velocidade do vento a 2 m de altura ( $U_2$ , m s<sup>-1</sup>).

Caso	Região	Modelo	Fonte	Eq.
1	Qualquer região	Valor observado	Allen et al. (1998)	-
2	Qualquer região	$U_2 = 2$	Allen et al. (1998)	(27)

(Caso 1) A primeira opção é utilizar o valor observado da velocidade do vento a 2 m de altura ( $U_2$ , m s<sup>-1</sup>).

(Caso 2) Valor (2 m s<sup>-1</sup> - média calculada em 2000 estações em diferentes países) representativo na escala mensal.

**Tabela 18.** Estimação da radiação solar global ( $Q_g$ , MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) por modelos alternativos.

Caso	Região	Modelo	Fonte	Eq.
1	Qualquer região	Valor observado	Allen et al. (1998)	-
2	Qualquer região	$Q_g = \left(a + b \cdot \frac{n}{H}\right) Q_0$	Allen et al. (1998)	(28)
3	Qualquer região	$Q_g = \theta \cdot Q_0 \cdot \sqrt{T_X - T_N}$	Hargreaves (1983)	(29)

(Caso 1) A primeira opção é utilizar o valor observado da radiação solar global ( $Q_g$ , MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

(Caso 2) a (adimensional) e b (adimensional) se referem aos parâmetros empíricos determinados por intermédio de análise de regressão linear para diferentes regiões (Tabela 5), n à insolação (h d<sup>-1</sup>) e H à duração máxima teórica do dia (h d<sup>-1</sup>):  $H = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s$ .

(Caso 3)  $\theta$  se refere ao parâmetro empírico: (i) regiões continentais: 0,16 e (ii) regiões costeiras: 0,19. Na inexistência dos valores de insolação, pode-se estimar a radiação global utilizando os valores da temperatura máxima ( $T_X$ , °C) e mínima ( $T_N$ , °C).

**Tabela 19.** Parâmetros empíricos a e b determinados por intermédio de análise de regressão linear para diferentes regiões para a estimação da radiação global.

Caso	Região	a	b	Fonte
1	Indefinida	0,25	0,50	Allen et al. (1998)
2	Ilha Solteira (SP)	0,24	0,52	Conceição (2006)

(Caso 1) Valores recomendados quando a região não apresenta os valores dos parâmetros empíricos (a e b).

**Tabela 20.** Tabela de conversão de radiação.

	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	J cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	cal cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	W m <sup>-2</sup>	mm d <sup>-1</sup>
1 MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1	100	23,9	11,6	0,408
1 cal cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	4,1868 10 <sup>-2</sup>	4,1868	1	0,485	0,0171
1 W m <sup>-2</sup>	0,0864	8,64	2,06	1	0,035
1 mm d <sup>-1</sup>	2,45	245	58,5	28,4	1

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).

BURBA, G.G.; VERMA, S.B.; KIM, J. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.94, p.31-51, 1999.

CONCEIÇÃO, M.A.F. Modelos de estimativa do saldo de radiação na região noroeste do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16., 2006, Goiânia. Anais... Juazeiro: ABID, 2006. 1 CD-ROM.

HARGREAVES, G.H. Discussion of 'Application of Penman wind function' by Cuenca, R.H. and Nicholson, M.J. **Journal of Irrigation and Drainage**. Engrg., ASCE, v.109. n.2, p.277-278, 1983.

PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C.; VILLA NOVA, N.A. Estimativa do balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.201-206, 1998.

SOUCH, C.; WOLFE, C.; GRIMMOND, C. Wetland evaporation and energy partitioning: Indiana Dunes National Lakeshore. *Journal of Hydrology*. v.184, p.189-208, 1996.

TASUMI, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Ph. D. Dissertation, University of Idaho, Moscow, Idaho. 2003.

TREZZA, R. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage**. Div. (ASCE), v.108, p.57-74, 2002.