

EFICIÊNCIA PRODUTIVA E SUSTENTABILIDADE AGRÍCOLA: INTEGRAÇÃO DE DADOS QUANTITATIVOS PARA PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO



<https://doi.org/10.56238/arev6n4-065>

Data de submissão: 05/11/2024

Data de publicação: 05/12/2024

Eduardo Silva Vasconcelos

Doutorado em Engenharia Elétrica – Processamento da Informação
Instituto Federal Goiano
Goiânia, Goiás, Brasil
E-mail: educelos1@gmail.com

Fernando Augusto dos Santos

Mestre em Agronegócios
Instituto Federal Goiano
Cristalina, Goiás, Brasil
E-mail: fernando.augusto@ifgoiano.edu.br

RESUMO

A agricultura moderna enfrenta desafios relacionados ao aumento da produtividade, conservação de recursos naturais e redução de impactos ambientais. Este estudo utiliza o robusto *Agriculture and Farming Dataset*, disponível na plataforma Kaggle, para explorar a eficiência produtiva e a sustentabilidade em diferentes combinações de tipo de solo e estação de cultivo. Foram analisados dados sobre práticas agrícolas, insumos, rendimento, e sustentabilidade econômica e ambiental. Focou-se em duas combinações contrastantes: Loamy-Zaid e Peaty-Kharif. Os resultados indicam que Loamy-Zaid apresenta maior produtividade absoluta (33,38 toneladas), mas à custa de maior consumo de insumos (6,36 toneladas de fertilizantes e 68.033,80 m³ de água). Em contrapartida, Peaty-Kharif demonstra maior eficiência no uso de fertilizantes (5,85 toneladas por tonelada de fertilizante) e água (0,00064 toneladas por m³), com menor custo por tonelada produzida (163,20 unidades monetárias, contra 197,11 de Loamy-Zaid). Estes resultados destacam os trade-offs entre produtividade e eficiência de recursos. A análise de combinações específicas de solo e estação revelou que fatores edáficos e sazonais influenciam significativamente a produtividade. O solo Silty em Rabi mostrou-se ideal, alcançando produtividade média de 48,02 toneladas, enquanto Peaty em Rabi exibiu limitações severas (3,86 toneladas), demonstrando a importância de estratégias personalizadas de manejo. Além disso, métodos modernos de irrigação, como *drip* e *sprinkler*, apresentaram maior eficiência hídrica, embora métodos tradicionais como irrigação manual tenham obtido rendimentos superiores em pequenos sistemas agrícolas.

Os achados fornecem subsídios para práticas agrícolas mais sustentáveis e produtivas. Estratégias otimizadas de manejo, como correção de solos, uso de biofertilizantes e técnicas de irrigação avançadas, podem alinhar produtividade, economia de recursos e sustentabilidade ambiental. Este estudo oferece diretrizes valiosas para pesquisadores, agricultores e formuladores de políticas, promovendo uma agricultura resiliente e competitiva em resposta às crescentes demandas globais por alimentos e recursos naturais.

Palavras-chave: Eficiência Produtiva. Sustentabilidade Agrícola. Gestão de Recursos

1 INTRODUÇÃO

A agricultura desempenha um papel essencial na economia global e na garantia da segurança alimentar, sendo crucial para atender às demandas de uma população crescente em um cenário de mudanças climáticas e recursos naturais limitados (Domene et al., 2023). Diante de desafios complexos, como o aumento da produtividade, a conservação de recursos e a mitigação de impactos ambientais, o setor agrícola exige soluções fundamentadas em análises integradas e detalhadas. Nesse contexto, o uso de dados e modelos quantitativos tornou-se indispensável para compreender as dinâmicas dos sistemas agrícolas, subsidiar a tomada de decisão e promover práticas que combinem eficiência produtiva e sustentabilidade.

Este estudo baseia-se no *Agriculture and Farming Dataset*, disponível na plataforma *Kaggle*, que oferece uma vasta gama de informações sobre práticas agrícolas, rendimentos de culturas, utilização de insumos e indicadores econômicos e ambientais. O conjunto de dados abrange variáveis-chave, como tipos de cultura, características do solo, métodos de irrigação e estações de cultivo, permitindo uma análise aprofundada das interações entre esses fatores e seus efeitos sobre a produtividade agrícola. A riqueza das informações contidas neste dataset proporciona uma oportunidade única para identificar padrões e propor estratégias que equilibrem a produtividade e a conservação ambiental.

Os principais aspectos abordados incluem:

1. Tipos de cultura: análise das culturas predominantes e suas respectivas taxas de rendimento, considerando diferentes condições.
2. Uso de recursos: avaliação da alocação e eficiência no uso de água e fertilizantes, com foco na sustentabilidade.
3. Indicadores de sustentabilidade: exame dos impactos ambientais e da viabilidade econômica das práticas agrícolas.
4. Dados econômicos: estudo detalhado de custos, receitas e margens de lucro, oferecendo uma visão integrada da competitividade econômica.

O objetivo central deste trabalho é investigar como as combinações de tipo de solo e estação influenciam a produtividade agrícola, a eficiência no uso de insumos e a sustentabilidade das práticas adotadas, propondo estratégias para otimizar essas interações. Para tanto, os objetivos específicos incluem:

1. Avaliar a eficiência no uso de insumos como fertilizantes e água em relação à produção obtida.
2. Comparar custos operacionais e sustentabilidade entre diferentes combinações, identificando trade-offs críticos.

3. Propor recomendações que maximizem a produtividade enquanto minimizam impactos econômicos e ambientais.

A análise concentra-se em duas combinações contrastantes de solo e estação: Loamy-Zaid e Peaty-Kharif, selecionadas por suas distintas características em produtividade, consumo de insumos e viabilidade econômica. A abordagem descritiva e inferencial adotada explora padrões de uso de recursos, custos operacionais e eficiência produtiva, buscando compreender fatores determinantes para o desempenho agrícola e propor práticas que otimizem a relação entre produtividade e sustentabilidade.

Os resultados destacam que Loamy-Zaid apresenta maior produtividade absoluta, embora com elevados custos operacionais e consumo significativo de insumos. Em contrapartida, Peaty-Kharif demonstra maior eficiência no uso de recursos, custos reduzidos por tonelada produzida e maior sustentabilidade econômica, revelando-se uma alternativa viável em cenários de restrição de recursos. A interação entre as características do solo e as condições sazonais revelou-se determinante, reforçando a importância de abordagens personalizadas na gestão agrícola.

Este estudo oferece uma contribuição significativa ao aprofundar a compreensão dos fatores que afetam o desempenho agrícola, orientando agricultores, pesquisadores e formuladores de políticas na construção de sistemas agrícolas mais resilientes, produtivos e sustentáveis. Ao integrar perspectivas agronômicas, econômicas e ambientais, os resultados fornecem uma base sólida para práticas que atendam às crescentes demandas globais por alimentos com responsabilidade ambiental e competitividade econômica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A literatura sobre eficiência produtiva e sustentabilidade agrícola destaca a necessidade de abordagens integradas que equilibrem produtividade, uso de recursos e mitigação de impactos ambientais. Nesse contexto, práticas de manejo sustentável, a gestão de insumos essenciais e estratégias adaptativas ao clima emergem como pilares fundamentais para a construção de sistemas agrícolas resilientes. A análise de estudos recentes evidencia a complexidade e as oportunidades do setor agropecuário brasileiro, reforçando o papel do planejamento estratégico na promoção de soluções que aliam desenvolvimento econômico à preservação ambiental.

Ogino et al. (2021) analisam as inter-relações entre os preços de fertilizantes minerais, o poder de compra dos produtores e o consumo no Centro-Oeste do Brasil. Os fertilizantes são descritos como insumos cruciais para a produtividade em solos pobres, como os do cerrado, mas sua dependência de importações expõe o setor à volatilidade do mercado. Políticas de estabilização de preços e incentivo à pesquisa em tecnologias alternativas são recomendadas para fortalecer a sustentabilidade produtiva.

Castro et al. (2017) investigam a relação entre valor da produção, produtividade e uso de insumos em estados brasileiros, destacando que o aumento do uso de fertilizantes entre 1990 e 2012 impulsionou a produtividade agrícola, mesmo diante de limitações de expansão territorial. Essa intensificação, embora essencial, reforça a necessidade de práticas que maximizem os ganhos de eficiência sem comprometer os recursos naturais.

Paz et al. (2002) enfatizam a importância da uniformidade na irrigação por aspersão como fator determinante para maximizar a eficiência econômica e reduzir o impacto ambiental. A gestão hídrica otimizada, economizando até 18,64% de água, revela-se indispensável para sustentar a produtividade em cenários de escassez de recursos e variabilidade climática.

Montoya e Finamore (2020) discutem a relação entre recursos hídricos e agronegócio, evidenciando a dependência hídrica do setor agrícola, responsável por 90% do consumo de água no Brasil. O estudo reforça a necessidade de práticas que otimizem o uso da água, assegurando maior eficiência econômica e ambiental diante de um cenário de crescente escassez hídrica.

Novak et al. (2021) destacam que práticas de manejo sustentável, como o plantio de espécies nativas e a ausência de mecanização, são fundamentais para restaurar a qualidade química do solo e promover a sustentabilidade agrícola em longo prazo. Essas práticas reforçam a importância da estabilidade ecológica no desempenho produtivo.

França et al. (2021) apontam a relevância das propriedades físicas do solo, como textura e porosidade, para a manutenção da fertilidade e a redução da erosão. O manejo adequado da matéria orgânica e a preservação de agregados do solo são cruciais para a eficiência produtiva e o equilíbrio ambiental.

Oliveira et al. (2022) analisam medidas de adaptação às mudanças climáticas em Nova Friburgo, RJ, destacando práticas conservacionistas como plantio direto e adubação verde. Essas estratégias promovem resiliência climática e minimizam impactos ambientais, integrando conservação ambiental e produtividade em um cenário de vulnerabilidade regional.

Magalhães et al. (2021) ressaltam a relevância de práticas como zoneamento agroclimático e manejo sustentável de culturas para aumentar a resiliência do setor agropecuário frente às mudanças climáticas. A diversificação produtiva e a adoção de tecnologias inovadoras são apontadas como estratégias para alinhar produtividade e preservação ambiental.

Essa revisão bibliográfica evidencia que a eficiência produtiva e a sustentabilidade agrícola dependem de estratégias baseadas na integração de conhecimentos técnicos, inovação tecnológica e manejo adaptativo. A literatura reforça a importância de políticas públicas e ações privadas que

estimulem práticas agrícolas responsáveis, consolidando o setor como um pilar do desenvolvimento sustentável

3 METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a eficiência produtiva e a sustentabilidade agrícola em diferentes combinações de tipos de solo e estações de cultivo. Para isso, utilizou-se o conjunto de dados *Agriculture and Farming Dataset*, obtido na plataforma *Kaggle*, que contém informações abrangentes sobre práticas de manejo, rendimento de culturas, uso de insumos e indicadores econômicos. Este conjunto de dados foi essencial para identificar interações entre variáveis agrícolas e propor estratégias que promovam maior eficiência e sustentabilidade.

As variáveis analisadas incluíram dados numéricos, como área cultivada (em acres), consumo de fertilizantes (em toneladas), aplicação de pesticidas (em quilogramas), produção total (em toneladas) e uso de água (em metros cúbicos), além de variáveis categóricas, como tipo de cultura, método de irrigação, tipo de solo e estação de cultivo. Essa ampla granularidade permitiu um estudo detalhado, destacando as combinações Loamy-Zaid e Peaty-Kharif devido às suas distintas características em termos de produtividade e consumo de recursos.

A primeira etapa do estudo consistiu na importação e tratamento dos dados utilizando a linguagem Python, com o suporte das bibliotecas Pandas e NumPy. Técnicas de limpeza de dados foram aplicadas para corrigir inconsistências, como valores faltantes ou discrepantes, os quais foram mantidos se relevantes para a análise. As variáveis categóricas foram codificadas por *label encoding* para viabilizar análises quantitativas e estatísticas.

A análise descritiva das variáveis numéricas foi realizada por meio de histogramas, com o objetivo de identificar tendências gerais e padrões nas distribuições. Uma matriz de correlação de Pearson foi gerada para avaliar relações entre variáveis numéricas, sendo visualizada por mapas de calor, o que permitiu destacar interações significativas, como o impacto do consumo de água na produtividade. Para as variáveis categóricas, gráficos de barras foram utilizados para explorar distribuições e calcular a produtividade média associada a diferentes tipos de solo e métodos de irrigação.

Uma análise cruzada entre tipos de solo e estações de cultivo foi conduzida para identificar as combinações mais produtivas. Mapa de calor foi empregado para representar as interações entre essas variáveis, com foco nas configurações Loamy-Zaid e Peaty-Kharif. Essas combinações foram submetidas a análises detalhadas de consumo médio de fertilizantes, uso de água e produtividade. A

eficiência no uso de insumos foi calculada pela razão entre a produção total e os insumos aplicados, permitindo avaliar a eficácia de cada combinação em transformar recursos em rendimento produtivo.

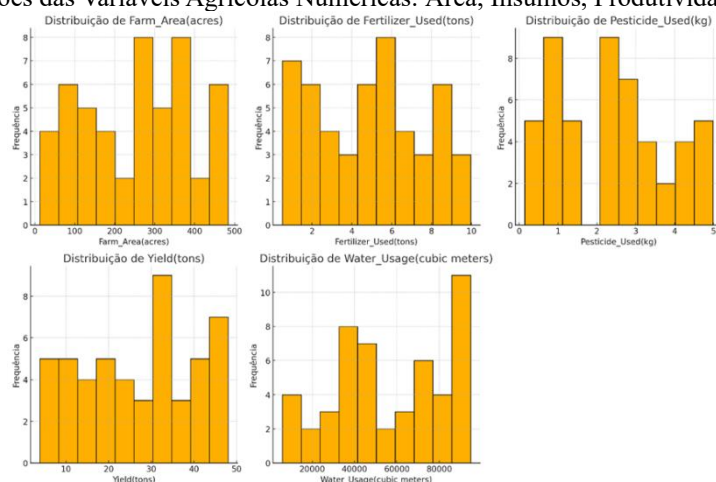
A metodologia adotada seguiu rigorosos princípios de reprodutibilidade científica e conformidade ética, assegurando o tratamento adequado dos dados conforme os termos da plataforma de origem. Apesar de limitações, como a ausência de variáveis climáticas ou de políticas agrícolas, os resultados obtidos fornecem bases robustas para a compreensão e o aprimoramento de práticas agrícolas eficientes e sustentáveis em diversos contextos produtivos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta uma análise detalhada dos resultados obtidos a partir do modelo ajustado, com foco na produtividade agrícola, uso de recursos e eficiência em diferentes combinações de solo e estação. As variáveis numéricas e categóricas foram exploradas para identificar padrões significativos, correlações e tendências que possam orientar práticas agrícolas mais sustentáveis e eficazes. A análise considera o desempenho das combinações Loamy-Zaid e Peaty-Kharif, destacando trade-offs entre produtividade, custos e sustentabilidade, com base em dados empíricos.

A Figura 1 apresentada contém histogramas que ilustram as distribuições das principais variáveis numéricas extraídas do conjunto de dados agrícola analisado. Esses gráficos fornecem uma visão geral da dispersão e padrões subjacentes em variáveis relacionadas à produtividade, insumos e recursos agrícolas, permitindo uma análise detalhada do comportamento dos dados e possíveis correlações com os resultados obtidos.

Figura 1: Distribuições das Variáveis Agrícolas Numéricas: Área, Insumos, Produtividade e Uso de Recursos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O primeiro gráfico representa a **distribuição de Farm_Area (acres)**, indicando que a maioria das fazendas possui áreas entre 100 e 400 acres, com uma concentração mais significativa em torno de 200 e 300 acres. Essa distribuição sugere que pequenas e médias propriedades predominam no dataset, o que pode influenciar o uso de insumos e a produtividade agrícola.

O segundo gráfico aborda a **distribuição de Fertilizer_Used (tons)**. A análise mostra que o uso de fertilizantes é relativamente uniforme, com valores variando de 0,5 a 10 toneladas, e uma concentração ligeiramente maior entre 5 e 8 toneladas. Essa distribuição reflete diferentes estratégias de manejo, que podem estar associadas às características do solo e aos tipos de culturas analisadas.

O terceiro gráfico apresenta a **distribuição de Pesticide_Used (kg)**, destacando que a maior parte das fazendas utiliza menos de 3 kg de pesticidas. Contudo, há uma cauda direita mais longa, com algumas fazendas aplicando até 5 kg. Esse padrão pode indicar práticas seletivas de controle de pragas, possivelmente relacionadas à diversidade de culturas e à severidade das infestações.

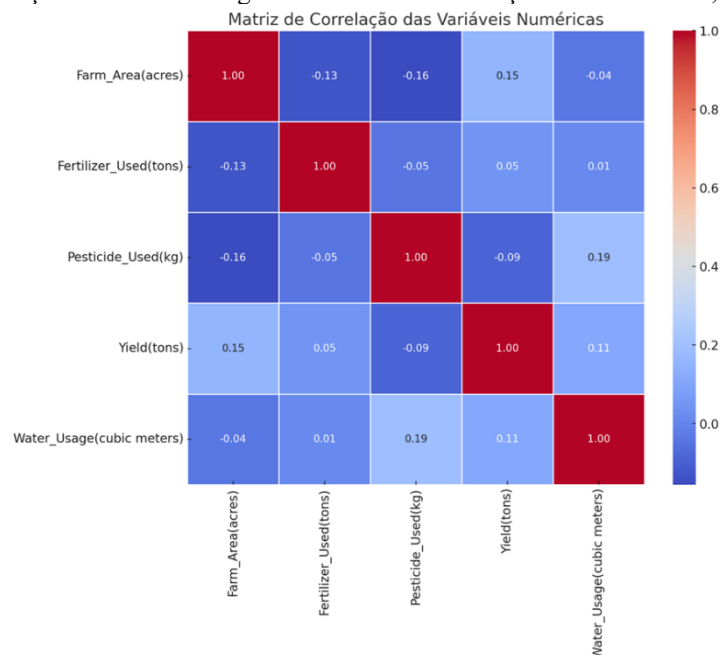
O quarto gráfico representa a **distribuição de Yield (tons)**, evidenciando que a produtividade concentra-se predominantemente entre 15 e 40 toneladas, com um pico mais acentuado próximo a 30 toneladas. Esse resultado indica uma consistência geral na produção, embora variações possam ser atribuídas a diferenças nos métodos de manejo e nas condições ambientais.

Por fim, o quinto gráfico mostra a **distribuição de Water_Usage (cubic meters)**, com um consumo variando amplamente entre 20.000 e 80.000 metros cúbicos, mas com uma leve inclinação para valores mais baixos. Esse comportamento sugere que, embora o consumo de água seja substancial, há uma fração considerável de fazendas que adota práticas de irrigação mais moderadas.

Essas distribuições fornecem uma base sólida para análises subsequentes, permitindo explorar correlações entre as variáveis e identificar padrões que podem orientar práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis. A análise detalhada das relações entre área de cultivo, insumos e produtividade será fundamental para compreender os trade-offs e propor estratégias que equilibrem desempenho econômico e impacto ambiental.

A Figura 2 apresentada a seguir consiste em uma matriz de correlação das variáveis numéricas analisadas no conjunto de dados agrícolas. Essa matriz foi construída utilizando o coeficiente de correlação de Pearson, que mede a força e a direção das relações lineares entre variáveis. A escala varia de -1 a 1, onde valores positivos indicam correlação direta, valores negativos indicam correlação inversa e valores próximos de zero sugerem pouca ou nenhuma relação linear.

Figura 2: Matriz de Correlação das Variáveis Agrícolas Numéricas: Relações entre Insumos, Recursos e Produtividade



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A **Farm_Area (acres)** apresenta correlações fracas com as demais variáveis, com destaque para sua relação moderada e positiva com a **Yield (tons)** (0,15). Isso sugere que fazendas maiores tendem a apresentar rendimentos ligeiramente superiores, mas outros fatores podem desempenhar papéis mais significativos na determinação da produtividade.

A variável **Fertilizer_Used (tons)** mostra uma correlação fraca com a **Yield (tons)** (0,05), indicando que o uso de fertilizantes tem um impacto positivo, mas não significativo, na produtividade. Essa observação pode refletir a presença de limitações em outros fatores de produção, como condições do solo e manejo de água, que afetam a eficácia dos fertilizantes.

O **Pesticide_Used (kg)** demonstra uma correlação negativa, embora fraca, com a **Yield (tons)** (-0,09), sugerindo que o aumento no uso de pesticidas pode não estar diretamente associado a ganhos de produtividade e, em alguns casos, pode até refletir problemas de manejo ou surtos de pragas em condições adversas.

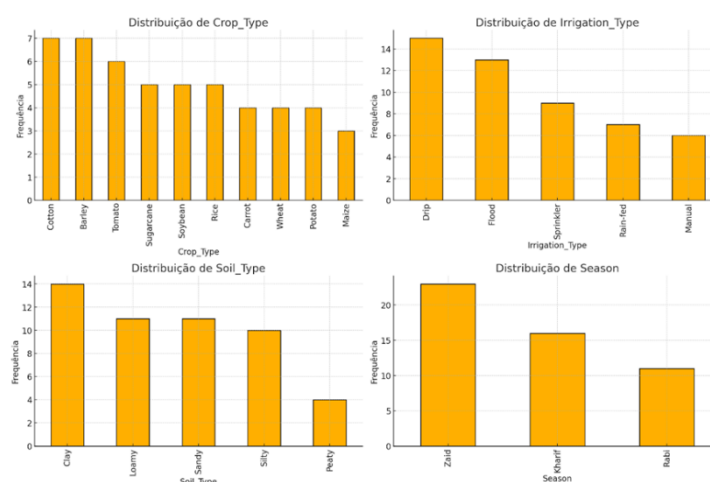
A **Water_Usage (cubic meters)** apresenta uma correlação fraca e positiva com a **Yield (tons)** (0,11), indicando que um maior consumo de água está relacionado a um ligeiro aumento na produtividade. No entanto, a baixa intensidade dessa relação reforça a necessidade de práticas de irrigação eficientes, que maximizem a produtividade sem aumentar significativamente o consumo hídrico.

Os resultados da matriz destacam a complexidade das interações entre variáveis agrícolas e sugerem que a produtividade não é definida isoladamente por nenhum insumo específico, mas sim por

um conjunto integrado de fatores. Essa análise fundamenta a necessidade de abordagens multifatoriais para a otimização da produção agrícola, considerando aspectos econômicos, ambientais e de manejo de recursos. Além disso, a baixa correlação entre os insumos sugere oportunidades para práticas mais sustentáveis, onde o uso racional de recursos pode ser implementado sem comprometer a produtividade.

A Figura 3 apresentada a seguir contém quatro gráficos que ilustram as distribuições das principais variáveis categóricas no conjunto de dados agrícola, abordando **tipo de cultura (Crop_Type)**, **método de irrigação (Irrigation_Type)**, **tipo de solo (Soil_Type)** e **estação de cultivo (Season)**. Cada gráfico contribui para uma melhor compreensão da frequência relativa e predominância dos diferentes fatores categóricos que influenciam a produtividade agrícola.

Figura 2: Distribuição de Variáveis Categóricas em Sistemas Agrícolas: Culturas, Irrigação, Tipos de Solo e Estações de Cultivo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O primeiro gráfico, referente à **distribuição de Crop_Type**, revela que as culturas mais predominantes no conjunto de dados são *Cotton* e *Barley*, seguidas por *Tomato* e *Sugarcane*. Culturas como *Rice*, *Wheat*, e *Maize* têm menor representatividade. Esse padrão pode refletir práticas agrícolas predominantes em determinadas regiões ou preferências culturais e econômicas relacionadas à demanda de mercado.

O segundo gráfico, que trata da **distribuição de Irrigation_Type**, evidencia que o método de irrigação por *Drip* é o mais utilizado, seguido por *Flood* e *Sprinkler*. Métodos mais tradicionais, como *Manual*, apresentam menor frequência, indicando uma possível transição para sistemas mais automatizados e eficientes. Isso pode estar associado à busca por maior eficiência no uso da água, especialmente em áreas onde esse recurso é escasso.

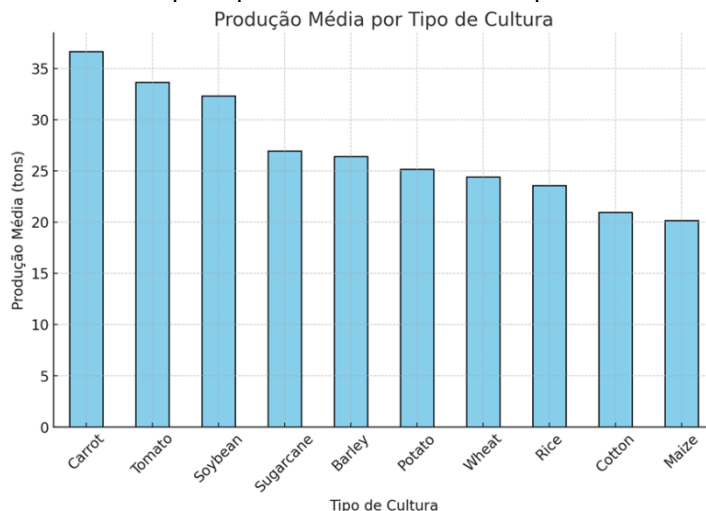
A **distribuição de Soil_Type**, mostrada no terceiro gráfico, destaca que solos *Clay* e *Loamy* são os mais frequentes no conjunto de dados, enquanto *Peaty* é o menos representado. Essa distribuição pode ser atribuída às características agronômicas dos solos, com *Clay* e *Loamy* frequentemente associados a condições favoráveis para o cultivo. A baixa frequência de solos *Peaty* sugere que esse tipo de solo é menos comumente utilizado ou apresenta restrições específicas para o manejo agrícola.

Por fim, o quarto gráfico aborda a **distribuição de Season**, indicando que a estação *Zaid* possui maior frequência, seguida por *Kharif* e *Rabi*. Essa prevalência de *Zaid* pode estar relacionada à disponibilidade hídrica e climática favorável durante esse período, enquanto as diferenças nas frequências das outras estações podem refletir práticas regionais ou limitações impostas por condições ambientais.

Esses gráficos permitem compreender a predominância de determinados fatores categóricos no conjunto de dados e levantam hipóteses sobre como esses fatores podem influenciar a produtividade e o manejo agrícola. A análise dessas distribuições é fundamental para identificar padrões e planejar estratégias que maximizem a eficiência e a sustentabilidade nas práticas agrícolas.

O gráfico apresentado na Figura 4 ilustra a produção média (em toneladas) associada a diferentes tipos de culturas incluídas no conjunto de dados agrícola. Essa análise é fundamental para compreender as variações no desempenho produtivo entre culturas, permitindo identificar aquelas com maior potencial de rendimento e analisar os fatores que podem influenciar essas diferenças.

Figura 4: Produtividade Média por Tipo de Cultura: Análise Comparativa de Rendimento Agrícola



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados indicam que *Carrot* apresenta a maior produtividade média, superior a 35 toneladas, seguida de *Tomato* e *Soybean*, que também exibem altos índices de rendimento. Essas culturas destacam-se por sua capacidade de responder de forma mais eficiente às condições de manejo

e aos insumos empregados, tornando-se opções atrativas para maximização da produção em determinadas regiões.

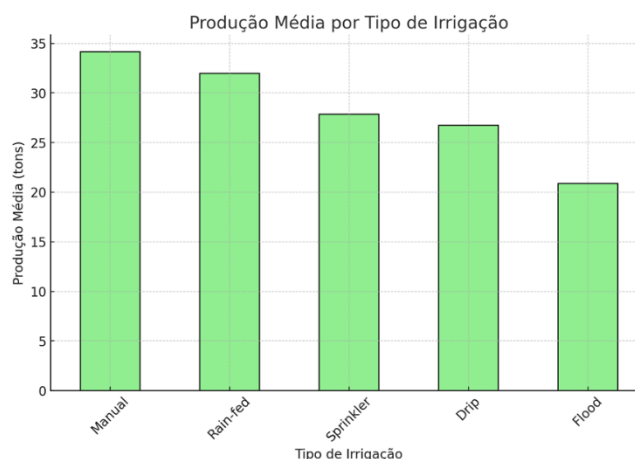
Culturas como *Sugarcane*, *Barley* e *Potato* ocupam posições intermediárias, com produtividades médias variando entre 25 e 30 toneladas. Esses resultados refletem o potencial competitivo dessas culturas, que podem ser exploradas em contextos específicos dependendo da viabilidade econômica e das condições edafoclimáticas.

No extremo inferior, encontram-se *Rice*, *Cotton* e *Maize*, com rendimentos médios abaixo de 25 toneladas. A menor produtividade dessas culturas pode estar associada a fatores como menor intensidade de insumos, limitações intrínsecas do cultivo ou práticas agrícolas menos avançadas. No entanto, essas culturas possuem importância estratégica em muitas regiões, devido à sua relevância econômica e demanda de mercado.

Este gráfico destaca as disparidades na produtividade entre diferentes culturas, sugerindo que escolhas estratégicas devem ser feitas com base em análises regionais, disponibilidade de recursos e demanda econômica. Adicionalmente, as culturas com menor produtividade média apresentam oportunidades para otimização, por meio da introdução de tecnologias e práticas de manejo mais avançadas. Essa análise reforça a importância de estratégias agrícolas integradas para maximizar o rendimento e a sustentabilidade em diversos contextos produtivos.

O gráfico apresentado na Figura 5 analisa a produtividade média (em toneladas) em função dos diferentes tipos de irrigação empregados nas práticas agrícolas. Este gráfico fornece insights relevantes sobre como os métodos de manejo hídrico podem influenciar a eficiência produtiva nas culturas analisadas.

Figura 5: Produtividade Média por Tipo de Irrigação: Análise do Impacto das Técnicas de Irrigação na Produção Agrícola



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O método de irrigação *Manual* apresenta a maior produtividade média, alcançando valores superiores a 35 toneladas. Apesar de ser uma técnica tradicional, sua alta produtividade pode estar relacionada ao controle direto do manejo hídrico, permitindo ajustes precisos às necessidades específicas das culturas. No entanto, é importante considerar que esse método pode ser mais intensivo em mão de obra, limitando sua aplicabilidade em larga escala.

O sistema *Rain-fed* surge como o segundo mais produtivo, com uma média próxima a 30 toneladas. Este método, que depende das precipitações naturais, pode ser vantajoso em regiões com chuvas regulares e bem distribuídas ao longo do ciclo das culturas. Contudo, sua dependência de fatores climáticos limita sua eficácia em regiões com variabilidade ou escassez hídrica.

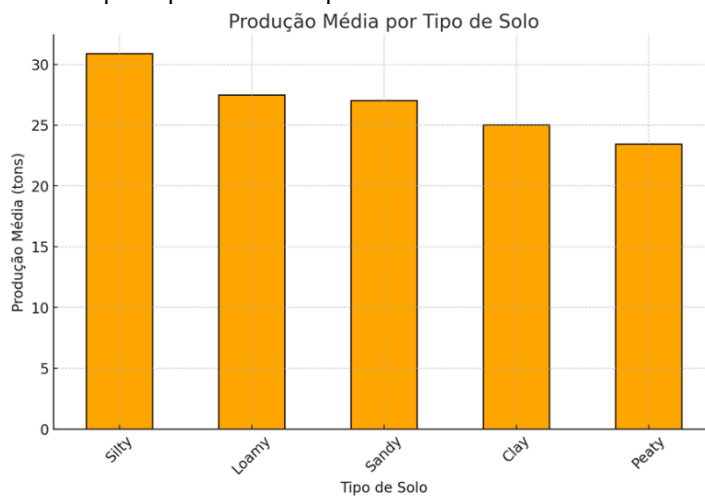
Os sistemas *Sprinkler* e *Drip* exibem produtividades médias similares, na faixa entre 25 e 30 toneladas. Ambos representam métodos modernos e altamente eficientes no uso da água, reduzindo o desperdício e melhorando a uniformidade da irrigação. A produtividade moderada observada nesses métodos pode ser atribuída a variáveis externas, como o tipo de solo e a cultura cultivada, que afetam a resposta ao manejo.

Por outro lado, o método de irrigação *Flood* apresenta a menor produtividade média, abaixo de 25 toneladas. Essa técnica, caracterizada por grandes volumes de água que inundam a área cultivada, é frequentemente associada a perdas significativas de água e ao aumento do risco de lixiviação de nutrientes. Embora seja amplamente utilizado em determinadas culturas, como arroz, sua baixa eficiência hídrica pode comprometer os resultados produtivos em outros contextos.

A análise apresentada no gráfico destaca a importância de alinhar os métodos de irrigação às características das culturas, do solo e do ambiente, buscando maximizar a eficiência hídrica e a produtividade. Métodos como *Sprinkler* e *Drip* oferecem alternativas sustentáveis ao manejo hídrico tradicional, enquanto práticas como a irrigação manual podem ser otimizadas em situações específicas. Assim, a escolha do sistema de irrigação ideal depende de uma avaliação integrada das necessidades agrícolas e da disponibilidade de recursos.

O gráfico apresentado na Figura 6 a seguir exibe a produção média (em toneladas) em função dos diferentes tipos de solo incluídos no conjunto de dados. A análise evidencia a influência das características físicas e químicas do solo no rendimento agrícola, oferecendo insights valiosos para práticas de manejo e seleção de solos para cultivos específicos.

Figura 6: Produtividade Média por Tipo de Solo: Impacto das Características Edáficas no Rendimento Agrícola



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O solo *Silty* apresenta a maior produtividade média, ultrapassando 30 toneladas. Este tipo de solo é amplamente reconhecido por sua textura fina e excelente capacidade de retenção de água e nutrientes, características que favorecem o desenvolvimento saudável das plantas e, consequentemente, um alto rendimento produtivo. Essa superioridade sugere que, quando disponível, o solo *Silty* pode ser uma opção preferencial para cultivos intensivos.

Os solos *Loamy* e *Sandy* seguem em produtividade, com valores médios em torno de 27 a 28 toneladas. O solo *Loamy* é frequentemente considerado ideal para a agricultura devido ao seu equilíbrio entre areia, silte e argila, proporcionando boa drenagem e retenção de nutrientes. O solo *Sandy*, por sua vez, apesar de apresentar baixa retenção de água, pode ser vantajoso em culturas que demandam boa drenagem e manejo hídrico eficiente.

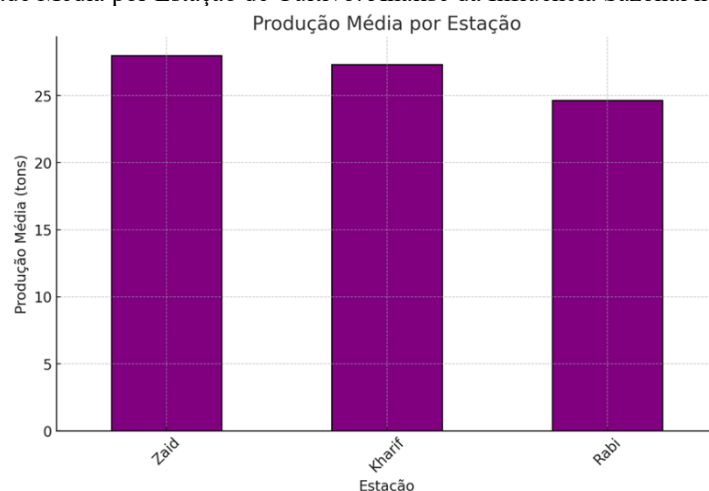
Os solos *Clay* e *Peaty* exibem as menores produtividades médias, com rendimentos inferiores a 27 toneladas. O solo *Clay*, devido à sua textura pesada e baixa permeabilidade, pode dificultar o crescimento radicular e a infiltração de água, especialmente em condições de manejo inadequado. Já o solo *Peaty*, embora rico em matéria orgânica, apresenta desafios como alta acidez e menor disponibilidade de nutrientes essenciais, o que pode limitar seu potencial produtivo em determinadas culturas.

Esses resultados destacam a importância de alinhar o tipo de solo às demandas específicas das culturas e às práticas de manejo. Solos de alta produtividade, como *Silty* e *Loamy*, podem ser preferenciais para maximizar o rendimento em sistemas agrícolas intensivos, enquanto solos com limitações, como *Clay* e *Peaty*, exigem intervenções específicas, como correções de pH, adubação adequada e práticas de conservação. Assim, a escolha do solo deve ser fundamentada em análises

edáficas detalhadas, considerando tanto o potencial produtivo quanto a viabilidade econômica e ambiental.

O Figura 7 apresenta a produtividade média (em toneladas) associada às três principais estações de cultivo: *Zaid*, *Kharif* e *Rabi*. Essa análise permite compreender como as condições sazonais influenciam o rendimento das culturas agrícolas, fornecendo subsídios para o planejamento estratégico das práticas de manejo e alocação de recursos.

Figura 7: Produtividade Média por Estação de Cultivo: Análise da Influência Sazonal no Rendimento Agrícola



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A estação *Zaid* apresenta a maior produtividade média, ligeiramente superior a 25 toneladas. Esse desempenho pode ser atribuído às condições climáticas favoráveis dessa estação, caracterizadas por temperaturas moderadas e disponibilidade hídrica adequada, que favorecem o desenvolvimento das plantas. Adicionalmente, a menor incidência de pragas e doenças durante *Zaid* pode contribuir para o aumento da eficiência produtiva.

A estação *Kharif* segue de perto *Zaid*, com uma produtividade média similar. *Kharif* coincide com a temporada de monções em muitas regiões, fornecendo abundância de água por meio das chuvas. No entanto, os desafios associados ao excesso de precipitação, como encharcamento do solo e lixiviação de nutrientes, podem limitar o desempenho de algumas culturas. Além disso, a alta umidade durante *Kharif* pode aumentar a incidência de pragas e doenças, o que exige estratégias de manejo mais rigorosas.

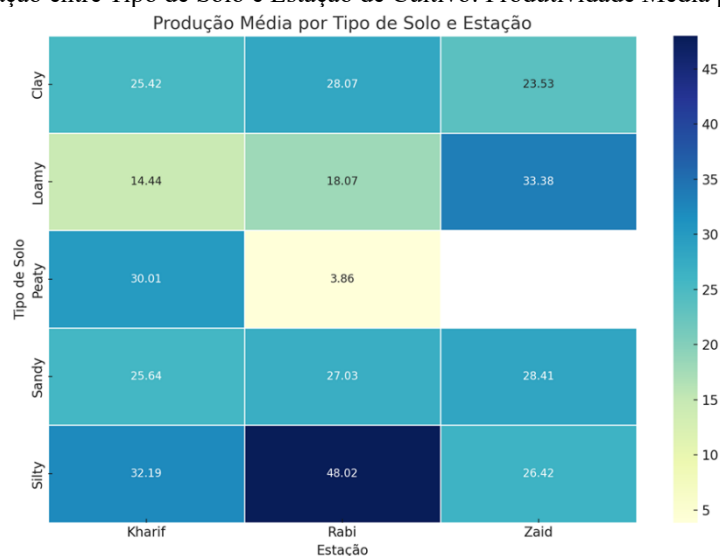
A estação *Rabi* apresenta a menor produtividade média, embora a diferença em relação às outras estações seja relativamente pequena. *Rabi* é caracterizada por temperaturas mais baixas e menor disponibilidade hídrica, o que pode restringir o crescimento de culturas sensíveis a essas condições. No entanto, os sistemas de irrigação e práticas de manejo adaptadas para essa estação podem mitigar

parcialmente os impactos das limitações climáticas, permitindo um rendimento competitivo em muitas situações.

Esse gráfico destaca a importância de considerar as características sazonais na escolha das culturas e nas estratégias de manejo agrícola. Enquanto *Zaid* e *Kharif* oferecem condições ideais para muitas culturas, *Rabi* exige maior atenção à disponibilidade de recursos e técnicas de irrigação para alcançar resultados produtivos satisfatórios. A análise sazonal, portanto, é essencial para otimizar o planejamento agrícola e promover a sustentabilidade em diferentes contextos produtivos.

O gráfico de calor apresentado na Figura 8 ilustra a produtividade média (em toneladas) para diferentes combinações de tipos de solo e estações de cultivo. Essa representação visual facilita a análise integrada, destacando as interações entre condições edáficas e sazonais no rendimento agrícola. Cada célula do gráfico reflete a média produtiva de uma combinação específica, permitindo identificar cenários ideais e limitações associadas a essas variáveis.

Figura 8: Interação entre Tipo de Solo e Estação de Cultivo: Produtividade Média por Combinação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A combinação de solo *Silty* durante a estação *Rabi* apresenta a maior produtividade média, atingindo 48,02 toneladas. Este resultado destaca a excelente capacidade do solo *Silty* de reter nutrientes e água, combinada com as condições climáticas moderadas de *Rabi*, que favorecem o desenvolvimento das culturas. Contudo, o desempenho de *Silty* em outras estações, como *Kharif* e *Zaid*, é menos expressivo, sugerindo que sua resposta produtiva depende de um manejo sazonal adequado.

O solo *Loamy*, reconhecido por seu equilíbrio entre drenagem e retenção de nutrientes, apresenta a maior produtividade média durante *Zaid* (33,38 toneladas). Essa combinação se beneficia

das condições climáticas favoráveis dessa estação e do desempenho consistente do solo *Loamy*, demonstrando sua versatilidade como substrato agrícola. Por outro lado, o rendimento de *Loamy* em *Kharif* e *Rabi* é consideravelmente menor, com 14,44 e 18,07 toneladas, respectivamente, indicando que sua produtividade pode ser limitada em condições mais adversas.

O solo *Peaty* exibe comportamento contrastante, com sua maior produtividade observada em *Kharif* (30,01 toneladas), mas um desempenho extremamente reduzido em *Rabi* (3,86 toneladas). Isso sugere que o solo *Peaty*, embora rico em matéria orgânica, enfrenta limitações significativas sob as condições climáticas mais secas de *Rabi*, provavelmente devido à baixa capacidade de retenção de água e alta acidez.

Os solos *Clay* e *Sandy* apresentam rendimentos moderados e relativamente consistentes entre as estações, com ligeiras variações. No entanto, em *Zaid*, o solo *Clay* demonstra queda na produtividade (23,53 toneladas), enquanto *Sandy* exibe uma leve melhoria (28,41 toneladas). Essas variações refletem as características físicas desses solos, como a baixa permeabilidade de *Clay* e a boa drenagem de *Sandy*, que respondem de forma diferenciada às condições sazonais.

Este gráfico de calor fornece uma visão integrada sobre como as combinações de tipo de solo e estação influenciam a produtividade agrícola. Os resultados destacam que decisões estratégicas sobre alocação de culturas devem considerar tanto as condições edáficas quanto as sazonais para maximizar a produção e a eficiência. Além disso, combinações específicas, como *Silty* em *Rabi* e *Loamy* em *Zaid*, representam cenários ideais para sistemas agrícolas otimizados, enquanto solos como *Peaty* em estações desfavoráveis requerem estratégias de manejo específicas para mitigar suas limitações. A análise ressalta a importância de abordagens personalizadas na agricultura moderna, promovendo um equilíbrio entre produtividade, sustentabilidade e viabilidade econômica.

A Tabela 1 apresentada compara os recursos empregados e os resultados produtivos para duas combinações distintas de solo e estação: *Loamy-Zaid* e *Peaty-Kharif*. As variáveis analisadas incluem o uso médio de fertilizantes (em toneladas), o consumo de água (em metros cúbicos) e a produtividade média (em toneladas), proporcionando uma visão clara dos trade-offs entre insumos e rendimento agrícola.

Tabela 1: Comparação do Uso de Recursos e Produtividade entre as Combinações Loamy-Zaid e Peaty-Kharif

Combinação	Fertilizer_Used(tons)	Water_Usage(cubic m)	Yield(tons)
Loamy-Zaid	6,355714	68033,7957	33,38
Peaty-Kharif	5,133333	46602,47333	30,006667

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A combinação *Loamy-Zaid* apresenta a maior produtividade média, atingindo 33,38 toneladas. Contudo, essa vantagem produtiva está associada a um maior consumo de insumos, como 6,36 toneladas de fertilizantes e 68.033,80 metros cúbicos de água. Esses valores indicam uma demanda elevada de recursos para sustentar a produtividade superior, o que pode impactar negativamente os custos operacionais e a sustentabilidade ambiental, especialmente em regiões com restrições de recursos hídricos.

Por outro lado, a combinação *Peaty-Kharif* demonstra uma produtividade ligeiramente inferior, com média de 30,01 toneladas, mas utiliza significativamente menos recursos. O consumo de fertilizantes é de 5,13 toneladas, enquanto o uso de água é de 46.602,47 metros cúbicos. Esses dados refletem uma eficiência comparativamente maior no uso de insumos, tornando essa combinação uma alternativa atrativa em cenários onde os custos ou a disponibilidade de recursos sejam limitantes.

A análise comparativa evidencia que a combinação *Loamy-Zaid*, apesar de ser a mais produtiva, apresenta uma eficiência menor no uso de recursos. Para cada tonelada de fertilizante aplicado, a produtividade é de aproximadamente 5,25 toneladas em *Loamy-Zaid*, enquanto *Peaty-Kharif* alcança uma eficiência de 5,85 toneladas. O mesmo padrão se repete no consumo de água, onde *Peaty-Kharif* também supera *Loamy-Zaid* em termos de eficiência hídrica.

Esses resultados levantam importantes considerações sobre a viabilidade de cada combinação. *Loamy-Zaid* é ideal para maximizar a produção em condições onde os insumos estão prontamente disponíveis e o impacto ambiental não é um fator crítico. Já *Peaty-Kharif* se destaca como uma escolha mais sustentável e econômica, especialmente em regiões onde a conservação de recursos é prioritária.

A tabela destaca a necessidade de uma abordagem equilibrada na tomada de decisões agrícolas. Estratégias que otimizem o uso de fertilizantes e água em *Loamy-Zaid* podem melhorar sua eficiência e reduzir seus impactos ambientais. Por outro lado, investimentos em tecnologias e manejo específico podem elevar o desempenho de *Peaty-Kharif*, tornando-a ainda mais competitiva. Esses insights reforçam a importância de análises integradas para alinhar produtividade, custo e sustentabilidade em sistemas agrícolas diversificados.

A Tabela 2 e o Gráfico 9 a seguir analisam a eficiência no uso de insumos para duas combinações distintas de solo e estação: *Loamy-Zaid* e *Peaty-Kharif*. A tabela quantifica a produção por tonelada de fertilizante (*Yield_per_Fertilizer*) e por metro cúbico de água (*Yield_per_Water*),

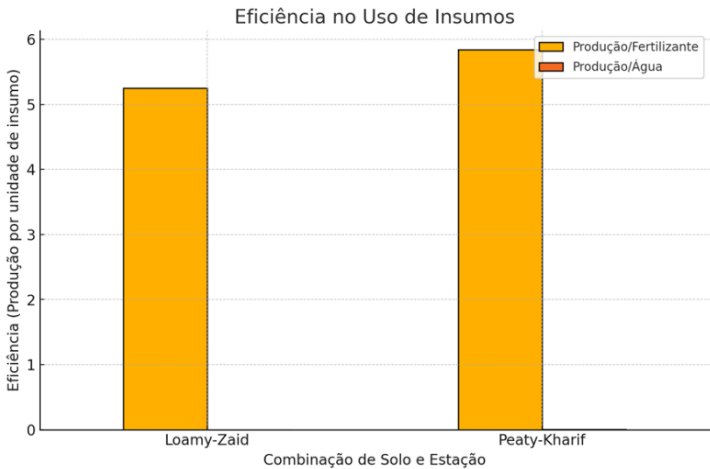
enquanto o gráfico visualiza comparativamente esses índices de eficiência, destacando as disparidades entre as combinações.

Tabela 2: Eficiência no Uso de Insumos: Comparação entre Loamy-Zaid e Peaty-Kharif

Combinação	Fertilizer_Used (tons)	Water_usage (cubic m)	Yield (tons)	Yiel_per_Fertilize	Yield_per_Water
Loamy-Zaid	6,3557	68033,7957	33,38	5,2519	0,00049
Peaty-Kharif	5,1333	46602,4733	30,0066	5,8454	0,00064

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Gráfico 9: Eficiência Comparativa no Uso de Fertilizantes e Água entre Combinações de Solo e Estação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na combinação *Loamy-Zaid*, a produção por tonelada de fertilizante é de 5,22 toneladas, enquanto a eficiência hídrica é de 0,00049 toneladas por metro cúbico de água. Esses valores refletem uma produtividade elevada, mas associada a um uso consideravelmente maior de insumos, indicando que, embora eficaz em maximizar a produção absoluta, *Loamy-Zaid* apresenta uma eficiência limitada no uso dos recursos empregados.

Por outro lado, a combinação *Peaty-Kharif* demonstra maior eficiência em ambas as métricas. Para cada tonelada de fertilizante utilizado, a produtividade média é de 5,85 toneladas, superando *Loamy-Zaid*. Similarmente, a eficiência no uso da água atinge 0,00064 toneladas por metro cúbico, representando uma melhoria significativa em relação à outra combinação. Esses dados destacam *Peaty-Kharif* como uma alternativa mais sustentável em cenários onde a disponibilidade de recursos é limitada.

O Gráfico 9 reforça visualmente as diferenças apontadas pela tabela, evidenciando que *Peaty-Kharif* supera consistentemente *Loamy-Zaid* em ambas as métricas de eficiência. A disparidade é particularmente pronunciada na eficiência hídrica, sugerindo que *Peaty-Kharif* pode ser uma escolha

mais viável em regiões onde o acesso à água é restrito ou onde práticas agrícolas sustentáveis são prioritárias.

A análise apresentada enfatiza os trade-offs entre produtividade absoluta e eficiência no uso de insumos. Enquanto *Loamy-Zaid* é mais adequado para contextos onde maximizar o rendimento é o objetivo principal, *Peaty-Kharif* oferece uma abordagem equilibrada entre produção e conservação de recursos. Estratégias que combinem práticas otimizadas de manejo em ambas as combinações podem ajudar a alinhar sustentabilidade e competitividade econômica, promovendo sistemas agrícolas mais resilientes e eficientes.

A Tabela 3 e o Gráfico 10 apresentados a seguir fornecem uma visão detalhada sobre os custos associados ao uso de fertilizantes e água, bem como a eficiência produtiva das combinações *Loamy-Zaid* e *Peaty-Kharif*. A análise examina os custos totais, os custos por tonelada produzida e os fatores de sustentabilidade que orientam as práticas agrícolas.

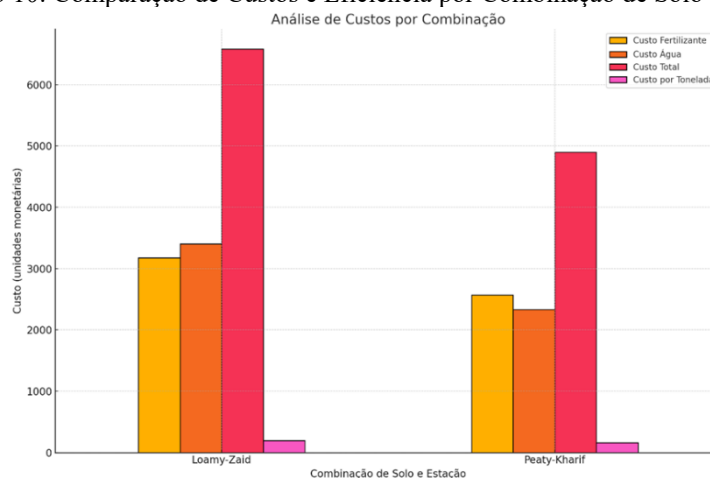
Tabela 3: Análise de Custos e Sustentabilidade para as Combinações *Loamy-Zaid* e *Peaty-Kharif*

Combination	Fertilizer_Used (tons)	Water_Usage (cubic meters)	Yield (tons)	Yield_per_Fertilizer	Yield_per_Water	Fertilizer_Cost	Water_Cost	Total_Cost	Cost_per_Ton
Loamy-Zaid	6,36	68033,80	33,38	5,22	0,00049	3177,86	3401,69	6579,55	197,11
Peaty-Kharif	5,13	46602,47	30,00	5,85	0,00064	2566,67	2330,12	4896,79	163,20

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 3 destaca que a combinação *Loamy-Zaid* apresenta um custo total de 6.579,55 unidades monetárias, significativamente superior ao custo total de 4.896,79 unidades monetárias de *Peaty-Kharif*. Essa diferença se deve, principalmente, ao maior consumo de água (68.033,80 metros cúbicos contra 46.602,47 metros cúbicos) e fertilizantes (6,36 toneladas contra 5,13 toneladas) em *Loamy-Zaid*. Consequentemente, o custo por tonelada produzida em *Loamy-Zaid* (197,11 unidades monetárias) é maior em comparação a *Peaty-Kharif* (163,20 unidades monetárias), o que reforça a menor eficiência econômica dessa combinação.

Gráfico 10: Comparação de Custos e Eficiência por Combinação de Solo e Estação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O Gráfico 10 visualiza a distribuição dos custos em cada combinação, evidenciando que *Loamy-Zaid* possui maiores despesas em todas as categorias: custo com fertilizantes, custo com água e custo total. Apesar disso, a produção de 33,38 toneladas em *Loamy-Zaid* é apenas ligeiramente superior às 30,00 toneladas observadas em *Peaty-Kharif*. Essa disparidade entre custos e produção reforça a menor eficiência geral de *Loamy-Zaid*.

A **eficiência sustentável** de *Peaty-Kharif* se destaca especialmente no custo por tonelada produzida, que é aproximadamente 17% inferior ao de *Loamy-Zaid*. Essa combinação também demonstra maior eficiência no uso de insumos, com melhor relação entre insumos aplicados e produtividade alcançada, conforme já destacado em análises anteriores.

Esses resultados têm implicações práticas importantes. Enquanto *Loamy-Zaid* pode ser preferido em cenários onde a prioridade é maximizar a produção absoluta, *Peaty-Kharif* oferece uma alternativa mais equilibrada entre custo, eficiência e sustentabilidade. Em contextos onde recursos hídricos são limitados ou onde a redução de custos é crucial, *Peaty-Kharif* apresenta vantagens claras.

A análise do Gráfico 10 reforça a importância de adaptar estratégias agrícolas às condições locais. Investimentos em práticas que otimizem o uso de recursos em *Loamy-Zaid* podem torná-lo mais competitivo, enquanto técnicas adicionais, como biofertilizantes, podem elevar ainda mais a eficiência de *Peaty-Kharif*. A decisão entre essas combinações deve considerar não apenas a produtividade, mas também os custos econômicos e o impacto ambiental.

As análises apresentadas ao longo dos gráficos e tabelas fornecem uma visão abrangente sobre os fatores que influenciam a produtividade agrícola, o uso de insumos e a sustentabilidade econômica e ambiental em diferentes combinações de solo, estação e práticas agrícolas. Essa abordagem integrada permite identificar padrões e trade-offs fundamentais para a otimização de sistemas agrícolas.

Os gráficos de **distribuição de variáveis categóricas** destacaram a predominância de certos tipos de culturas, solos e métodos de irrigação, sugerindo que práticas regionais e características agronômicas influenciam a escolha de insumos e manejo. Culturas como *Carrot* e *Tomato* apresentaram as maiores produtividades médias, reforçando sua relevância econômica. Métodos de irrigação mais tradicionais, como *Manual*, mostraram altos rendimentos, mas levantam questões sobre a escalabilidade e a eficiência no uso de recursos. O solo *Silty* e a estação *Rabi* se destacaram como cenários de alta produtividade em seus respectivos contextos.

A análise da matriz de correlação revelou interações fracas entre insumos como fertilizantes e pesticidas com a produtividade, sugerindo que a eficiência produtiva depende de um conjunto mais amplo de fatores, incluindo características do solo e condições sazonais. Essa complexidade reforça a necessidade de práticas de manejo personalizadas para maximizar os rendimentos.

As análises de combinações específicas, como *Loamy-Zaid* e *Peaty-Kharif*, mostraram contrastes significativos. *Loamy-Zaid* destacou-se pela produtividade absoluta mais elevada, mas à custa de maior consumo de recursos e custos operacionais. Por outro lado, *Peaty-Kharif* demonstrou maior eficiência no uso de fertilizantes e água, além de custos totais e por tonelada produzida significativamente menores, evidenciando sua viabilidade em cenários onde a sustentabilidade e a economia de recursos são prioritárias.

Os gráficos de calor que cruzaram o tipo de solo e a estação de cultivo ilustraram que a produtividade não depende isoladamente de um fator, mas de combinações específicas. O desempenho do solo *Silty* em *Rabi* e do solo *Loamy* em *Zaid* são exemplos de interações ideais que podem orientar o planejamento agrícola em diferentes regiões.

Por fim, a análise dos custos e sustentabilidade evidenciou que a eficiência econômica e ambiental varia substancialmente entre as combinações. A maior produtividade de *Loamy-Zaid* foi alcançada a um custo consideravelmente maior, enquanto *Peaty-Kharif* demonstrou ser uma alternativa mais sustentável, com custos operacionais mais baixos e menor impacto ambiental. Esses resultados enfatizam a necessidade de equilibrar produtividade, custos e sustentabilidade para atender às demandas agrícolas modernas.

Os resultados evidenciam que a combinação *Loamy-Zaid* oferece maior produtividade absoluta, mas apresenta alta demanda de insumos, especialmente água e fertilizantes. Em contrapartida, *Peaty-Kharif* destaca-se pela eficiência no uso de recursos e menor custo por tonelada produzida, emergindo como uma alternativa mais sustentável. As análises sugerem que decisões estratégicas devem equilibrar produtividade e sustentabilidade, considerando contextos específicos de

disponibilidade de recursos e prioridades econômicas. Essas conclusões fornecem subsídios valiosos para o planejamento agrícola eficiente.

No entanto, as análises reforçam que não há uma solução única ou universal para a maximização da produtividade agrícola. A escolha das combinações ideais de solo, estação e práticas agrícolas deve levar em consideração as condições locais, a disponibilidade de recursos e as prioridades do produtor, sejam elas econômicas ou ambientais. Além disso, estratégias de manejo adaptativo e o uso de tecnologias inovadoras, como biofertilizantes e sistemas de irrigação otimizados, podem melhorar o desempenho geral das combinações analisadas.

Esses resultados fornecem um guia valioso para pesquisadores, agricultores e formuladores de políticas, permitindo que decisões mais informadas sejam tomadas em busca de uma agricultura sustentável e competitiva. O próximo passo será aplicar essas análises em outros contextos, validando as descobertas e expandindo as possibilidades para diferentes sistemas de produção agrícola.

5 CONCLUSÕES

Este estudo analisou de forma abrangente as interações entre produtividade agrícola, uso de insumos e sustentabilidade em diferentes combinações de tipos de solo e estações de cultivo. Os resultados elucidaram padrões críticos que orientam decisões estratégicas voltadas à eficiência produtiva e à conservação de recursos.

As análises revelaram que variáveis categóricas, como tipo de solo e método de irrigação, exercem influência determinante sobre a produtividade. Culturas como *Carrot* e *Tomato* demonstraram maior rendimento médio, evidenciando sua adaptabilidade e relevância econômica. Solos *Silty* e *Loamy* destacaram-se como substratos adequados para cultivos intensivos, enquanto o solo *Peaty* apresentou limitações significativas em condições menos favoráveis, como na estação Rabi. A estação Zaid emergiu como a mais propícia para a maximização do rendimento, reforçando a importância de condições climáticas adequadas.

As interações específicas entre solo e estação reforçaram a necessidade de estratégias de manejo personalizadas. O solo *Silty* na estação Rabi apresentou o maior rendimento absoluto, enquanto a combinação *Loamy-Zaid* mostrou-se equilibrada em termos de insumos e produtividade. Em contrapartida, combinações como *Peaty-Rabi* ressaltaram a urgência de ajustes no manejo ou a substituição estratégica por solos mais adequados para condições desafiadoras.

No que se refere à eficiência no uso de insumos, as diferenças entre combinações foram marcantes. Embora *Loamy-Zaid* tenha alcançado maior produtividade absoluta, sua eficiência por unidade de insumo foi inferior à de *Peaty-Kharif*, que demonstrou maior eficiência no uso de

fertilizantes (5,85 toneladas por tonelada de fertilizante) e água (0,00064 toneladas por metro cúbico). Assim, Peaty-Kharif emerge como uma escolha mais sustentável em cenários de recursos limitados.

A análise de custos reforçou a superioridade econômica de Peaty-Kharif em termos de viabilidade, com custos totais 34% inferiores aos de Loamy-Zaid. O custo por tonelada de Peaty-Kharif (163,20 unidades monetárias) foi significativamente menor, destacando-se em contextos onde a eficiência econômica é prioritária.

Os achados indicam que Peaty-Kharif é ideal para sistemas que priorizam sustentabilidade e economia de recursos, enquanto Loamy-Zaid pode ser vantajoso em cenários onde a maximização da produtividade é essencial, desde que compensada por maior valor agregado. Investimentos em tecnologias de manejo, como biofertilizantes, irrigação otimizada e correções de solo, são recomendados para aumentar a eficiência dessas combinações em diferentes cenários produtivos.

As contribuições deste estudo fornecem uma base sólida para decisões agrícolas baseadas em dados, com aplicabilidade para produtores e formuladores de políticas públicas. Contudo, é necessário validar os resultados em outras regiões e sistemas de cultivo para assegurar sua generalização. A integração de produtividade, sustentabilidade e viabilidade econômica é indispensável para promover sistemas agrícolas resilientes e alinhados às crescentes demandas globais por alimentos e recursos naturais.

REFERÊNCIAS

- CASTRO, N. R.; SPOLADOR, H. F. S.; GASQUES, J. G. Valor da produção, produtividade e uso dos insumos na agricultura – uma análise descritiva para alguns estados brasileiros. *Perspectiva Econômica*, v. 13, n. 1, p. 1-23, jan./jul. 2017. DOI: 10.4013/pe.2017.131.01.
- DOMENE, S. M. A. et al. Segurança alimentar: reflexões sobre um problema complexo. *Estudos Avançados*, v. 37, p. 182-206, 2023. DOI: 10.1590/s0103-4014.2023.37109.012.
- FRANÇA, D. V. B.; COSTA, C. M.; SILVA, Q. D. Propriedades Físicas dos Solos: Uma Abordagem Teórico-Metodológica. *Ciência Geográfica*. Bauru, v. XXV, n. 4, p. 1571-1587, jan./dez. 2021. Disponível em: https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/revista/anoXXV_4/agb_xxv_4_web/agb_xxv_4-25.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.
- MAGALHÃES, G. O. et al. Agricultura e Sustentabilidade: Mudanças Climáticas e Modificações no Desenvolvimento Agropecuário. *Divers@ Revista Eletrônica Interdisciplinar, Matinhos*, v. 14, n. 1, p. 100-112, jan./jun. 2021. DOI: 10.5380/diver.v14i1.80514.
- MONTOYA, M. A.; FINAMORE, E. B. Os recursos hídricos no agronegócio brasileiro: Uma análise insumo-produto do uso, consumo, eficiência e intensidade. *Revista Brasileira de Economia*, v. 74, n. 4, p. 441-464, out./dez. 2020. DOI: 10.5935/0034-7140.20200021.
- NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; FERREIRA, F. S.; MAESTRE, M. R. Composição química do solo em diferentes condições ambientais. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 1063-1085, jul./set. 2021. DOI: 10.5902/1980509828995.
- OGINO, C. M.; COSTA JUNIOR, G.; POPOVA, N. D.; MARTINES FILHO, J. G. Poder de compra, preço e consumo de fertilizantes minerais: uma análise para o centro-oeste brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 59, n. 1, p. e220367, 2021. DOI: 10.1590/1806-9479.2021.220367.
- OLIVEIRA, S. F.; PRADO, R. B.; MONTEIRO, J. M. G. Impactos das mudanças climáticas na produção agrícola e medidas de adaptação sob a percepção de atores e produtores rurais de Nova Friburgo, RJ. *Interações, Campo Grande, MS*, v. 23, n. 4, p. 1179-1201, out./dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.20435/inter.v23i4.3548>.
- PAZ, V. P. S.; FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; FOLEGATTI, M. V. Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 3, p. 404-408, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/GzvJ5WjJDQBKNQMvWGMKRfM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 nov. 2024.