

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

OTIMIZAÇÃO E SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS

DIELLE OLIVEIRA FILOCRE RODRIGUES

JOÃO PESSOA

2018

DIELLE OLIVEIRA FILOCRE RODRIGUES

OTIMIZAÇÃO E SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Quirino do Nascimento

JOÃO PESSOA

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

R696o Rodrigues, Dielle Oliveira Filocre.
Otimização e Sustentabilidade de Agroecossistemas /
Dielle Oliveira Filocre Rodrigues. - João Pessoa, 2018.
106 f. : il.

Coorientação: Roberto Quirino do Nascimento.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Produtividade Agrícola. 2. Agroecossistemas
Sustentáveis. 3. Índice de Sustentabilidade. 4. Modelo
de Otimização. 5. Programação Geométrica. I. Título

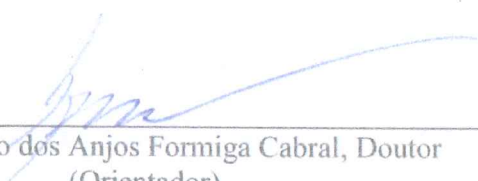
UFPB/BC

OTIMIZAÇÃO E SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS

DIELLE OLIVEIRA FILOCRE RODRIGUES

Esta Dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba.

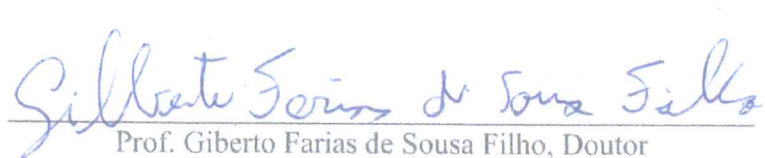
João Pessoa, 24 / 08 / 2018



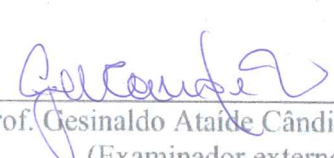
Prof. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral, Doutor
(Orientador)
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Roberto Quirino do Nascimento, Doutor
(Co-Orientador)
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Gilberto Farias de Sousa Filho, Doutor
(Examinador interno)
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Gesinaldo Ataíde Cândido, Doutor
(Examinador externo)
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

A Deus que me iluminou nesta caminhada, dando - me força, coragem e fé para chegar até aqui.

Aos meus pais, Isáac e Rita, pela educação, incentivo e apoio, assim como aos meus irmãos, Paolle Filocre e Moisés Filocre, por todo amor e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu orientador Roberto Quirino, por ter sido o grande “pai” desta pesquisa, se dedicando com muito afinco com todo seu conhecimento, comprometimento, dedicação e amizade.

Ao meu orientador Lucídio Cabral pelos conselhos dados, e por toda compreensão e confiança destinadas à conclusão desta dissertação.

Aos professores Gesinaldo Ataíde Cândido e Gilberto Farias pelas contribuições e sugestões de melhorias direcionadas a esta pesquisa.

Às novas amigas, com as quais compartilhei os momentos de alegria e de tensão, Widelene Menezes e Polyanna Sena, à qual sou grata pelo acolhimento quando mais precisei.

Às minhas amigas sempre presentes, Társila Moscoso e Carla Mailde, por todo apoio, companheirismo e amizade, ajudando nos momentos mais difíceis, e emanando energia positiva.

À secretária Ana, por toda atenção, colaboração e carinho destinados a mim.

Aos demais familiares e amigos que de alguma forma contribuíram para que eu conseguisse realizar esse grande objetivo em minha vida.

Renda-se como eu me rendi. Mergulhe no que
você não conhece, como eu mergulhei.
Pergunte, sem querer, a resposta, como estou
perguntando. Não se preocupe em “entender.”
Viver ultrapassa todo o entendimento.

Clarice Lispector

RESUMO

Muitas pesquisas têm buscado avaliar o nível de sustentabilidade em agroecossistemas por meio de ferramentas de sistemas de indicadores sustentáveis. Todavia, não foram encontradas muitas referências na literatura sobre modelagem matemática em agroecossistemas com propostas que envolvam os três pilares da sustentabilidade. Nesse sentido, esta pesquisa tem como objetivo construir um modelo de otimização que determine a maior produção possível de agroecossistemas, mantendo-os dentro de um nível estável de sustentabilidade, dado um índice de sustentabilidade. Para a construção do modelo de otimização, tomou-se como base os dados secundários obtidos do estudo realizado por Reis (2013), no que tange aos indicadores de sustentabilidade selecionados pela vinculação às características do ambiente e ao instrumento de avaliação da sustentabilidade IDS (S^3) para a definição das variáveis de decisão, dos dados tecnológicos e das restrições do problema formulado. Para a resolução do problema, utilizou-se da programação geométrica, cuja implementação foi feita em MATLAB com o auxílio do *toolbox* CVX. Os resultados encontrados apresentam solução ótima, tanto para o modelo quanto para o índice de sustentabilidade (IS), tendo em vista que mesmo se maximizando a produção, verificaram-se níveis estáveis de sustentabilidade para os agroecossistemas. Destaca-se que esta pesquisa é um diferencial em relação aos modelos de otimização encontrados na literatura no que tange ao tripé da sustentabilidade, e, principalmente, pela implementação da programação geométrica para a resolução do problema e validação do modelo de otimização e sustentabilidade em agroecossistemas.

Palavras-Chave: Produtividade Agrícola. Agroecossistemas Sustentáveis. Índice de Sustentabilidade. Modelo de Otimização. Programação Geométrica.

ABSTRACT

Many researches have sought to evaluate the level of sustainability in agroecosystems through tools of sustainable indicators systems. However, many references have not been found in the literature on mathematical modeling in agroecosystems with proposals that involve the three pillars of sustainability. In this sense, this research aims to build an optimization model that determines the largest possible production of agroecosystems, keeping them within a stable level of sustainability, given a sustainability index. For the construction of the optimization model, the secondary data obtained from the study carried out by Reis (2013) were used as a basis for the sustainability indicators selected by the link to the characteristics of the environment and the IDS sustainability assessment tool (S3) for the definition of the decision variables, the technological data and the constraints of the problem formulated. To solve the problem, we used the geometric programming, whose implementation was done in MATLAB with the help of the CVX toolbox. The results found present an optimal solution for both the model and the sustainability index (IS), considering that even if production is maximized, there are stable levels of sustainability for agroecosystems. It should be highlighted that this research is a differential in relation to the optimization models found in the literature regarding the tripod of sustainability, and, mainly, the implementation of the geometric programming to solve the problem and validation of the optimization and sustainability model in agroecosystems.

Keywords: Agricultural Productivity. Sustainable Agroecosystems. Sustainability Index. Optimization Model. Geometric Programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Processo de modelagem	49
Figura 2. Etapas adotadas para a seleção do portfólio de artigos	65
Figura 3. Função de Relação Negativa	81
Figura 4. Função de Relação Positiva	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Métodos para a construção de indicadores e avaliação da sustentabilidade agrícola	39
Quadro 2. Estado de sustentabilidade, conforme o IDS	43
Quadro 3. Modelos utilizados para resolução de problemas sustentáveis em agroecossistemas	46
Quadro 4. Quantidade de publicações identificadas na fase preliminar	63
Quadro 5. Artigos utilizados na revisão teórica.	66
Quadro 6. Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas	73
Quadro 7. Dados para a cultura de banana irrigada.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos Agroecossistemas Modernos	85
Tabela 2. Solução do problema para os Agroecossistemas	86
Tabela 3. O índice de sustentabilidade (IS)	91

LISTA DE SIGLAS

AGRO	AGROECOSSISTEMAS
CMMAD	COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO
COSERN	COMPANHIA DE ENERGIA ELÉTRICA DO RIO GRANDE DO NORTE
FESLM	FRAMEWORK FOR THE EVALUATION OF SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
IDEA	INDICATEURS DE DURABILITE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES
IDS (S ³)	INDICE DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
INDIGO	INDICATEUR DE DIAGNOSTIC GLOBAL A LA PARCELLE
IS	ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE
MESMIS	MARCO PARA LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE MANEJO DE RECURSOS NATURALES MEDIANTE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD
ONU	ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS
PG	PROGRAMAÇÃO GEOMÉTRICA
PNL	PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR
RSL	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA E IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA .	13
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.2.1. OBJETIVO GERAL	17
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3. JUSTIFICATIVA.....	17
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2. REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. COMPREENDENDO A SUSTENTABILIDADE	21
2.1.1. SUSTENTABILIDADE X DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	23
2.1.2. A ORIGEM DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	24
2.2. SUSTENTABILIDADE AGRÍCOLA	27
2.3. AGROECOSSISTEMAS.....	30
2.4. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	34
2.4.1. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE EM AGROECOSSISTEMAS	38
2.6. OTIMIZAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE EM AGROECOSSISTEMAS.....	44
2.6.1. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO DESENVOLVIDOS EM AGROECOSSISTEMAS	46
2.7. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	47
2.7.1. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO	50
2.7.2. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	52
2.7.3. PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR (PNL)	53
2.7.4. PROGRAMAÇÃO GEOMÉTRICA.....	55
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA A REVISÃO DA LITERATURA.....	62
4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO E SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS	69
4.1. DADOS DO MODELO.....	70
4.1.1. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	72
4.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	74
4.2.1. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS	75
4.2.2. PARÂMETROS TECNOLÓGICOS	75
4.2.3. DEFINIÇÃO DAS RESTRIÇÕES	76
4.2.4. FUNÇÃO OBJETIVO	79
4.3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	80
4.4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	83
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1. TESTE DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS.....	85
5.2. RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO O TOOLBOX CVX PARA O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO GEOMÉTRICA	86
5.3. SOLUÇÃO DO MODELO	90
5.4. ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE (IS).....	91

6. CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS	96
ANEXO A	106

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda os aspectos gerais da pesquisa, tendo como foco a delimitação do tema e do problema a ser estudado, a justificativa que esclarece a relevância deste estudo, bem como os objetivos que os norteiam. Por fim, é apresentada uma síntese da estrutura do trabalho, contemplando os aspectos principais de cada um dos capítulos.

1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA E IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

A compreensão do termo sustentabilidade, contextualizado no meio agrícola, é considerada de bastante relevância para o desenvolvimento econômico e social pautado na manutenção desse ambiente, na medida em que as práticas sustentáveis na utilização dos recursos naturais disponíveis e na produção de culturas de plantio possibilitam estados de estabilidade, equilíbrio e resiliência em consonância com os três pilares da sustentabilidade.

Como se sabe a sustentabilidade é compreendida como a possibilidade de se atender as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades (CMMAD, 1987) e deverá contemplar as dimensões ambientais, econômicas e sociais.

A sustentabilidade **ambiental** ocorre no sentido de que o ecossistema utilizado deve manter, através do tempo, suas características e inter-relações fundamentais; a **econômica**, no sentido de propiciar rendimentos constantes e estáveis; e a **social**, no sentido de que o manejo dos recursos naturais deve ser compatível com os valores culturais das comunidades e grupos envolvidos, devendo, também, ser contínuo através do tempo (EHLERS, 1999).

Portanto, para que haja o desenvolvimento sustentável em sistemas de produção agrícolas é imprescindível que haja a manutenção da capacidade do solo, assim como de todos os recursos naturais, a fim de manter a capacidade de sobrevivência de todos os organismos envolvidos no sistema, e garantir a sustentabilidade econômica e social da agricultura sem causar danos ambientais.

Nesse sentido, surge a visão de agroecossistemas, a qual deve englobar todos os organismos, e considerar as interações nos níveis de população, comunidade e ecossistema, tendo como prioridade a sustentabilidade. Portanto, os agroecossistemas são compreendidos

como um local de produção agrícola que mantém a base dos recursos do qual depende, contando com o uso mínimo de insumos vindos de fora do sistema, manejando pragas e doenças através de mecanismos reguladores internos e sendo capaz de se recuperar de perturbações causadas pelo manejo e colheita (GLEISMAN, 2009).

Para Altieri (1983), a sustentabilidade agrícola é a capacidade de um agroecossistema de manter a produção através do tempo na presença de repetidas restrições ecológicas e de pressões socioeconômicas. Nesse ínterim, a proposição de um modelo de otimização para agroecossistemas, que vise à obtenção da maximização da produtividade, mantendo níveis estáveis de sustentabilidade, e apresente como foco: a gestão da fertilidade do solo com o uso adequado de fertilizantes e quantidade de água, o controle do consumo de energia, de agrotóxicos, a gestão dos contratos de trabalho, dos preços do mercado, e da minimização dos custos de produção, torna-se essencial para a manutenção da resiliência e do equilíbrio das condições econômicas, sociais e ambientais.

Nesse contexto, os modelos de otimização podem ser considerados como uma forma de solucionar problemas que visem alcançar a eficiência e o equilíbrio das ações nos processos produtivos de agroecossistemas, proporcionando a manutenção e a interação dos agentes do sistema. Para Bavaresco (2007), esses modelos possibilitam descrever fenômenos reais em problemas que levam à previsão de tendências envolvendo um conjunto de relações matemáticas.

Um modelo matemático de otimização pode ser formulado em torno de um problema que tenha uma função objetivo de minimização ou de maximização, sendo essa função dependente das variáveis de decisão que, por sua vez, apresentam as restrições do sistema, para assim, efetivar a busca de uma solução viável que encontre o valor ótimo do modelo.

Dentre as técnicas de resolução de problemas em otimização, pode-se destacar a programação não-linear, a qual ocorre quando a função objetivo ou pelo menos uma equação ou inequação pertinente ao conjunto das restrições é não-linear e as variáveis de decisão são contínuas em seu domínio de definição. Ressalta-se que essas funções podem ser convexas ou não-convexas, algébricas ou transcendentais (PINHEIRO, 2012).

Quando se trata de funções não convexas, que são produtos de potências das variáveis de decisão, ou funções do tipo CobbDouglas, que é o caso da maioria das relações existentes na modelagem de agroecossistemas, uma metodologia que se faz oportuna é a programação geométrica, uma técnica desenvolvida na década de 1960 por R.J. Duffin e Clarence Zener, cujo objetivo inicial era resolver problemas de engenharia, mas que generaliza uma grande quantidade de problemas de otimização.

As funções envolvidas nesses problemas são chamadas de posinômios por serem uma generalização dos polinômios, uma vez que os expoentes das variáveis são números reais. Embora não seja um problema convexo, os problemas de programação geométrica podem ser transformados em problemas convexos ou em problemas cujas funções são diferentes de funções convexas.

Diante da compreensão dos métodos de otimização implementados nesse estudo, torna-se bastante imprescindível ressaltar que a utilização de sistemas de avaliação de indicadores de sustentabilidade, na implementação da modelagem de agroecossistemas, permite definir, selecionar e mensurar os indicadores relacionados à realidade desse ambiente, assim como, uma melhor proposição de problemas a serem otimizados que leve em consideração as três dimensões da sustentabilidade.

Nesse sentido, os questionamentos que ocorrem em torno da sustentabilidade voltam-se para a construção de indicadores que sejam capazes de mensurar as modificações nas características de um agroecossistema - objetivando diagnosticar como ele se apresenta em relação à sustentabilidade (CAMELO; CANDIDO, 2015). Os indicadores de sustentabilidade de agroecossistemas devem refletir as alterações nos atributos de produtividade, resiliência, estabilidade e equidade. Deve-se ressaltar que não existem indicadores “universais”, mas sim que cada sistema, dependendo de suas categorias e elementos específicos, tenha seu próprio conjunto de indicadores (DE CAMINO & MULLER, 1993).

Nesse trabalho será dada uma ênfase ao índice de desenvolvimento sustentável - IDS (S^3), um instrumento formulado por Sepúlveda (2008), o qual remete à mensuração de um valor específico de desempenho sustentável de unidades de análises (agroecossistemas) em determinado período de tempo. Para tanto, tomou-se como base, um estudo realizado em agroecossistemas que trabalham com a cultura de banana irrigada, o qual permitiu maiores informações das características pertinentes ao ambiente e ao sistema produtivo, bem como dos indicadores de sustentabilidade utilizados nesse estudo por meio do método IDS (S^3) para a avaliação da sustentabilidade.

Desse modo, pode-se ressaltar que muitos pesquisadores têm buscado avaliar o nível de sustentabilidade em agroecossistemas por meio de indicadores, no entanto, poucos trabalhos utilizam a modelagem matemática para otimizar a produtividade em consonância com os três pilares da sustentabilidade.

No que tange aos modelos de otimização, compreende-se que tem se tornado um fator-chave no aprimoramento do desenvolvimento econômico, ambiental e social de agroecossistemas, na medida em que tem se encontrado na literatura, um considerado número

de trabalhos relacionados com a modelagem matemática em sistemas de produção agrícolas que visam o alcance da sustentabilidade em suas atividades. No entanto, cabe salientar, que, embora, os estudos que implementam modelos matemáticos contribuam para a tomada de decisões em ambientes agrícolas que visam a sustentabilidade, a maioria dos modelos consideram apenas o aspecto econômico e/ou o ambiental da sustentabilidade. Exemplos de objetivos econômicos e ambientais em modelos de otimização geralmente são encontrados maximizando-se o valor presente líquido, ou minimizando-se as emissões de gases com efeito de estufa.

Segundo Ghaderi; Pishvae; Moini (2016), um pequeno número de trabalhos desenvolvidos na literatura em otimização consideram todos os três pilares da sustentabilidade. Nesse sentido, a lacuna na literatura encontrada referente aos poucos trabalhos realizados com modelagem matemática para otimizar os processos produtivos de agroecossistemas de acordo com o tripé da sustentabilidade, corrobora para a oportunidade de pesquisa, tornando-se pertinente a proposição de modelos de otimização em agroecossistemas que agreguem as três dimensões da sustentabilidade e contribua de forma significativa para o meio acadêmico.

Diante dessa contextualização, construir um modelo matemático para otimizar agroecossistemas de forma produtiva e sustentável (mantendo os níveis de estabilidade, equilíbrio e resiliência), compreende-se como um grande desafio na perspectiva de atender às três dimensões da sustentabilidade e suprir a lacuna encontrada na literatura.

Sendo assim, este trabalho apresenta o seguinte **problema** de pesquisa:

Quais as relações existentes entre produtividade, manejo e resiliência que permitem otimizar a produção em agroecossistemas atendendo a limiares de sustentabilidade existentes na literatura?

Diante do exposto, ao se compreender o tema em questão, observa-se que há possibilidade de propor modelos matemáticos que contribuam com a estabilidade, equilíbrio e resiliência de agroecossistemas na manutenção dos recursos naturais utilizados, da produtividade alcançada e da geração de empregos, estando esses fatores aliados às três dimensões da sustentabilidade – ambiental, econômica e social.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Dado um índice de sustentabilidade, construir um modelo de otimização que determine a maior produção possível de agroecossistemas, mantendo-os dentro de um nível estável de sustentabilidade.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Explorar os conceitos e abordagens de sustentabilidade, agricultura sustentável, sistemas de indicadores sustentáveis, agroecossistemas, modelagem matemática, programação não linear e programação geométrica;
- b) Selecionar agroecossistemas para a implementação da modelagem matemática;
- c) Definir as relações entre os agentes do agroecossistema e os indicadores de sustentabilidade do IDS (S^3);
- d) Construir o modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas;
- e) Propor um índice de sustentabilidade;
- f) Aplicar o método de programação geométrica para a resolução do problema; e
- g) Apresentar soluções que contribuam para fomentar a sustentabilidade de agroecossistemas.

1.3. JUSTIFICATIVA

O debate em torno de agroecossistemas sustentáveis tem adquirido bastante relevância para os estudos propostos em otimização, tendo em vista, possibilitar a construção de modelos matemáticos que contribuam para o desenvolvimento e produtividade de agroecossistemas pautados no equilíbrio do tripé da sustentabilidade – as dimensões sociais, ambientais e econômicas.

Como se sabe, os agroecossistemas são definidos como entidades regionais manejadas com o objetivo de produzir alimentos e outros produtos agropecuários, compreendendo as plantas e animais domesticados, elementos bióticos e abióticos do solo, rede de drenagem e de

áreas que suportam vegetação natural e vida silvestre. Os agroecossistemas incluem de maneira explícita o homem, tanto como produtor como consumidor, tendo, portanto, dimensões socioeconômicas, de saúde pública e ambiental (TOEWS, 1987; LOWRANCE, et al., 1984).

Nos territórios em que existe a forte presença da agricultura, há a produção de culturas em maior diversidade, em harmonia com a natureza e com respeito aos aspectos que são essenciais para agroecossistemas verdadeiramente sustentáveis. Nesse sentido, além do desafio de compreender melhor as temáticas tidas como objeto de estudo, verifica-se que o estudo de agroecossistemas sustentáveis é importante por tratar das condições climáticas adversas, de recursos financeiros, da escassez de água, do consumo de energia, do uso indevido de agrotóxicos, da necessidade do uso de fertilizantes para o solo, da preocupação com a biodiversidade, riqueza cultural e sabedoria dos povos e comunidades.

Diante da possibilidade de identificar e solucionar problemas relacionados ao nível de sustentabilidade em agroecossistemas, selecionou-se um estudo sobre a avaliação da sustentabilidade em agroecossistemas que trabalham com a cultura de banana irrigada, o qual permitiu, por meio dos indicadores de sustentabilidade utilizados com base na ferramenta IDS (S³), uma maior representação das variáveis e dados do ambiente para a aplicação do modelo de otimização.

Nesse sentido, vale ressaltar a importância da mensuração dos indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas para o estabelecimento de linhas norteadoras quanto a um posicionamento do que se espera de uma atividade sustentável, corroborando para o aprofundamento dessa pesquisa pautada em modelo de otimização.

Os indicadores de sustentabilidade podem ser utilizados em modelos de otimização para encontrar melhores estratégias de manutenção que equilibram os três pilares da sustentabilidade, econômicos, sociais e ambientais. (SABATINO; FRANGOPOL; DONG, 2015). No entanto, a otimização implementada nos modelos encontrados, geralmente é feita sob condições econômicas, ambientais ou sociais (De Meyer *et al.*, 2014), em poucos casos, os aspectos econômicos, ambientais e sociais são otimizados simultaneamente (Yue *et al.*, 2014).

A importância da modelagem matemática em agroecossistemas sustentáveis pode ser percebida pelo desenvolvimento de pesquisas no âmbito acadêmico que são realizadas no sentido de auxiliar nas discussões a respeito do tema, as quais consideram a incerteza dos níveis de produção devido a condições climáticas, diferentes períodos de crescimento e colheita, entre outros (GHADERI; PISHVAEE; MOINI, 2016). Na literatura observa-se uma

série de modelagens matemáticas desenvolvidas com estas finalidades, cuja aplicabilidade aborda aspectos macro (localidades como países, estados ou municípios) e aspectos micro (unidades produtivas, comunidades rurais), sendo esse último aspecto, necessariamente, o foco da pesquisa.

Neste sentido, verifica-se a necessidade bem como a relevância da realização de estudos que proponham a construção de modelos matemáticos para a otimização da produtividade em agroecossistemas que considerem, especificamente, o tripé da sustentabilidade, bem como a implementação de um índice de sustentabilidade que contribua para a manutenção do estado estável de sustentabilidade.

Portanto, pode-se evidenciar que o diferencial desta pesquisa em termos teóricos e práticos concentra-se na viabilização da construção de modelos matemáticos, delineando alternativas eficientes para a mitigação de perdas produtivas, aumento da produtividade, e porconsequinte o fortalecimento de sistemas agrícolas, além de gerar informações para o meio acadêmico que possam refletir uma nova forma de medir o nível da sustentabilidade em agroecossistemas.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos: Introdução, Revisão da Literatura, Procedimento Metodológico para a Revisão Sistemática da Literatura, Modelo de Otimização, Resultados e Discussões e as Conclusões da pesquisa.

O primeiro capítulo, conforme foi apresentado, aborda a contextualização do tema, apresentando a definição do problema de pesquisa aliada aos objetivos geral e específicos, a delimitação da pesquisa e a justificativa.

O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura realizada sobre o tema escolhido na pesquisa, a saber: A compreensão da Sustentabilidade, Desenvolvimento Sustentável x Sustentabilidade; Sustentabilidade agrícola, Agroecossistemas, os Sistemas de Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas; Otimização da Sustentabilidade em Agroecossistemas, Modelagem Matemática, Programação Não - Linear e Programação Geométrica. Já o terceiro capítulo compõe a primeira parte da metodologia, onde são apresentados os procedimentos realizados para a execução da revisão da literatura.

O quarto capítulo trata da construção do modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas, o qual compõe os dados secundários dos agroecossistemas selecionados como base nos indicadores de sustentabilidade para o modelo, a definição das variáveis de decisão, dos parâmetros, restrições e função objetivo, para a consecução da formulação do problema, e a implementação computacional com o intuito de encontrar a solução para o problema.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados, realizando uma comparação com os dados reais dos agroecossistemas estudados. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, resgatando seu principal objetivo, destacando as contribuições da pesquisa, as limitações e as sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas as abordagens teóricas que servirão de base para este estudo por meio das temáticas: Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável, Agricultura Sustentável, Agroecossistemas, Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas, Otimização da Sustentabilidade em Agroecossistemas, Modelagem Matemática, Programação Não Linear e Programação Geométrica.

2.1. COMPREENDENDO A SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade é um termo amplamente aplicado em diversas áreas de estudo e refere-se a tudo aquilo que pode ser mantido ou suportado, tendo como o intuito principal a obtenção de melhores condições de vida em um determinado ambiente, a partir da manutenção da capacidade de suporte para as próximas gerações.

A palavra sustentabilidade é freqüentemente utilizada em muitas combinações diferentes: desenvolvimento sustentável; crescimento sustentável; comunidade sustentável; indústria sustentável; economia sustentável; agricultura sustentável; etc. Como o seu significado que vem do latim “*sustentare*” significa sustentar, suportar, conservar em bom estado, manter, resistir, compreende-se, dessa forma, que sustentável é tudo aquilo que é capaz de ser suportado, mantido (SICHE *et al.*, 2007).

A sustentabilidade representa a possibilidade de se obterem condições iguais ou superiores de vida em dado ecossistema, de modo contínuo, visando a manutenção do sistema para o suporte da vida. Sendo assim, relaciona-se com a melhor qualidade de vida das populações, a partir da capacidade de suporte dos ecossistemas. (MARTINS; CÂNDIDO, 2010).

Cabe salientar que para alcançar o progresso em direção à sustentabilidade é claramente preciso de uma escolha da sociedade, das organizações, das comunidades e dos indivíduos. Como envolve diversas escolhas, a mudança só é possível se existir grande envolvimento da sociedade (VAN BELLEN, 2005).

Nesse sentido, a sustentabilidade consiste em manter, sustentar um sistema, onde seja possível crescer economicamente, respeitando os limites estabelecidos pela natureza, e

considerando as características e diversidades territoriais. No entanto, ainda existem controvérsias sobre o real significado que a temática da sustentabilidade transmite.

A compreensão da sustentabilidade abrange várias formas de percepção, uma vez que é permeada de valores baseados em diversos interesses que os atores sociais e institucionais têm acerca dos conceitos e práticas. Logo, o seu significado real dificulta os melhores resultados em sua aplicação (MARTINS; CÂNDIDO, 2010).

Segundo Van Bellen (2005), “o entendimento da sustentabilidade é variável, uma vez que existem muitas definições advindas de abordagens diversas”. Para o autor, o grau de sustentabilidade é relativo em função do campo ideológico ambiental ou da dimensão em que cada ator se coloca.

Para Silva (2010), a sustentabilidade não diz respeito somente à preservação ou à conservação de recursos naturais limitados e não renováveis, mas diz respeito também, a um padrão de organização de um sistema que se mantém ao longo do tempo em virtude de ter adquirido certas características que lhe conferem capacidades autocriativas.

Nesse contexto, sustentabilidade é um termo dinâmico e complexo, pois abrange vários elementos e parte de um sistema de valores, com foco, ao longo do tempo, em múltiplas escalas. Pode, assim, referir-se às necessidades de se reduzir a poluição ambiental, eliminar os desperdícios e diminuir o índice de pobreza e, por conseguinte, a desigualdade social (BARONI, 1992 *apud* SILVA; CANDIDO). Essa ênfase das diversas abordagens da sustentabilidade em se manter um sistema funcionando a longo prazo, sem interferir nos recursos necessários para a sobrevivência das próximas gerações, proporciona a apreensão com o desenvolvimento da sociedade de forma sustentável.

A preocupação com a preservação do meio ambiente, emparelhada com a melhoria das condições socioeconômicas da população, fez surgir o conceito de desenvolvimento sustentável, entendido como um processo evolutivo que vislumbra o crescimento da economia, a melhoria da qualidade do ambiente e da sociedade para o benefício das gerações presentes e futuras (FURLANETTO; CÂNDIDO; MARTINS, 2010).

Dessa forma, torna-se imprescindível uma maior contextualização acerca da temática sustentabilidade e de como se diferencia do desenvolvimento sustentável, com o intuito de se compreender melhor a diferença dos conceitos, qual a origem e o motivo de estarem presentes nas discussões de pesquisadores, da sociedade, Estado e instituições. Essa variedade de partes interessadas envolvidas nesse tipo de desenvolvimento, torna a sua análise bastante rica e diversificada.

2.1.1. Sustentabilidade x desenvolvimento sustentável

Existe uma diversidade de abordagens que procuram explicar a diferença entre os conceitos de desenvolvimento sustentável e de sustentabilidade. Pode-se verificar que alguns autores tratam a sustentabilidade como a busca da manutenção das condições de vida num dado ecossistema, e o desenvolvimento sustentável como a procurada integração das três dimensões da sustentabilidade para que haja crescimento da economia, melhoria da qualidade do ambiente e da sociedade para o benefício das gerações presentes e futuras.

A interdisciplinaridade que envolve as temáticas desenvolvimento sustentável e sustentabilidade faz com que esses temas estejam presentes nas discussões nos mais diversos campos da ciência, na iniciativa privada e pública, nas organizações governamentais e em toda a sociedade (MARTINS; CÂNDIDO, 2010).

A compreensão sobre a sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável ao longo da história vem sendo baseada nas preocupações da existência e da manutenção dos recursos naturais e de um ambiente propício à continuidade da vida humana aliados ao ritmo e à forma como o sistema capitalista direciona o desenvolvimento das sociedades e das organizações (SILVA, 2010).

A sustentabilidade refere-se às medidas tomadas para se assegurar que as condições ambientais e sociais apoiem a segurança humana, o bem-estar e a saúde, através da transformação dos estilos de vida das pessoas e dos modelos de produção (TAN; LU, 2016). Já o desenvolvimento sustentável pode ser amplamente definido como "o processo pelo qual as necessidades materiais e espirituais da população humana serão atendidas, sem degradar e até melhorar as condições sócio-ambientais que as sustentam" (MASERA ASTIER; LÓPEZ-RIDAURA, 1999; ASTIER *et al.*, 2011).

Segundo Garbie (2015, p.1), a sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável aumentaram a sensibilização nos últimos anos com base nas três dimensões, quais sejam, ambientais, sociais e econômicas da *Tripple Bottom Line* (TBL). Como se sabe, a TBL, foi desenvolvida por John Elkington em 1997, com a visão de que a sustentabilidade é sustentada por um tripé, composto pelos pilares, econômico, ambiental e social.

De acordo com Elkington (2012, p.15), "a sustentabilidade é o princípio que garante que as atitudes tomadas hoje não limitarão o conjunto de opções econômicas, sociais e ambientais disponíveis para as futuras gerações." O conceito de desenvolvimento sustentável tem ganhado ampla simpatia porque possui uma interpretação simples e satisfatória. Nesse

ponto pode ser um pouco divergente do objetivo “desenvolvimento que permanece”, mas, na tentativa de encontrar uma definição mais substantiva, é necessário discriminar entre um grande número de diferentes abordagens. (SICHE *et al.*, 2007).

Os objetivos do desenvolvimento sustentável desafiam as instituições contemporâneas. Elas têm reagido às mudanças globais relutando em reconhecer que esse processo esteja realmente ocorrendo. As diferenças em relação ao conceito de desenvolvimento sustentável são tão grandes que não existe um consenso sobre o que deve ser sustentado e tampouco sobre o que o termo sustentar significa. Consequentemente, não existe consenso sobre como medir a sustentabilidade (VAN BELLEN, 2005).

Nesse contexto, é preponderante se compreender como surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável e como tem afetado as mudanças da sociedade em sentido ao alcance da sustentabilidade em suas ações, além de promover a conscientização de que é um dever de todos a preservação dos recursos naturais e o equilíbrio entre as dimensões econômicas, ambiental e social para que haja realmente o desenvolvimento de forma sustentável.

2.1.2. A origem do desenvolvimento sustentável

Esse tema tornou-se destaque quando o mundo começou a se preocupar com a sobrevivência no futuro, percebendo-se que o crescimento econômico não bastava para se sustentar, tornando-se necessário levar em consideração a importância de ser socialmente justo, economicamente viável e ambientalmente responsável para que ocorresse efetivamente o desenvolvimento sustentável.

A literatura sobre a sustentabilidade da sociedade remonta há várias décadas. Os antigos escritores da China, Grécia e Roma formularam as ideias de como ser sustentável, viver em harmonia com a natureza e com os vizinhos (CISNEROS- SAGUILÁN *et al.*, 2015). Já a noção de desenvolvimento sustentável tem sua origem mais remota no debate internacional sobre o conceito de desenvolvimento. Trata-se, na verdade, da história da reavaliação da noção do desenvolvimento predominantemente ligado à ideia de crescimento (VAN BELLEN, 2005).

Alguns debates importantes sobre o conceito de desenvolvimento sustentável aconteceram no século XX, como o relatório sobre os limites de crescimento publicado em

1972 pelo Clube de Roma, o surgimento do conceito de ecodesenvolvimento em 1973 e a conferência da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre o meio ambiente em 1992. O relatório do Clube de Roma foi publicado no mesmo ano em que foi realizada a conferência de Estocolmo sobre o meio ambiente humano, rompendo com a ideia da ausência de limites para a exploração dos recursos da natureza, contrapondo-se claramente à concepção dominante de crescimento contínuo da sociedade industrial (VAN BELLEN, 2005).

Nesse contexto histórico pode-se verificar que as visões de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável surgiram na década de 1970, começando com a Conferência sobre o Ambiente Humano em Estocolmo em 1972. No entanto, a introdução do termo "desenvolvimento sustentável" ocorreu, em 1974, Cocoyot, em uma declaração durante a reunião das Organizações das Nações Unidas (ONU), no México. Em 1983, a ONU estabeleceu a Comissão Mundial de Ambiente e Desenvolvimento, e, em 1987, publicou o famoso documento "Nosso Futuro Comum", que definiu o conceito frequentemente utilizado "Desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazer as suas próprias necessidades " (CISNEROS - SAGUILÁN *et al.*, 2015).

Os autores acima, ainda relatam que, em 1989, a ONU começou a planejar a Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento do Rio de Janeiro em 1992, durante o qual a ideia se materializou e gerou o programa global Agenda 21, um manual de referência geradas para determinar as políticas corporativas e governamentais e decisões pessoais baseadas em princípios de sustentabilidade e comportamento que a humanidade deve seguir para permitir que gerações futuras tenham uma vida decente. Desde a Comissão Brundtland em 1987 e a Cúpula do Rio em 1992, os problemas sociais e ambientais têm sido destacados no governo, mídia, indústria e universidades (CISNEROS - SAGUILÁN *et al.*, 2015).

A Agenda 21, apresentada na Conferência das Organizações das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento em 1992, identificou claramente três componentes fundamentais do desenvolvimento sustentável: os pilares económico, ambiental e social. Os três pilares devem ser integrados e interligados de forma abrangente, permitindo a aplicação robusta de um método de avaliação abrangente (TAN; LU, 2016).

Recentemente, o debate foi reiniciado em relação aos objetivos pós-2015 para o desenvolvimento sustentável e a expiração pendente do calendário para os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM). As Organizações das Nações Unidas estão empurrando para a frente um novo conjunto de metas para a agenda pós-2015 que visa alcançar o desenvolvimento sustentável a longo prazo da sociedade humana como um todo. Esses

objetivos comprometem os países a novas metas de ação visando o uso sustentável da água, uso de energia e práticas agrícolas, bem como promover um desenvolvimento econômico mais inclusivo (ONU, 2014; BIGS *et al.*, 2015).

Cabe ressaltar que a CMMAD, em 1992, tratou os meios de subsistência sustentáveis como meio de ligar as preocupações socioeconômicas e ambientais para o foco nas pessoas e suas atividades de subsistência e colocou essas preocupações dentro de uma estrutura de políticas para o desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, as abordagens sobre meios de subsistência sustentáveis evoluíram com a perspectiva erradicação da pobreza e participação em discussões sobre propriedade de recursos, necessidades básicas e segurança de meios de subsistência rural, evitando a desertificação, o desmatamento, a erosão do solo, o declínio dos lençóis freáticos e a salinização, buscando beneficiar a conservação ambiental por meio de atividades compatíveis com o clima, como o reflorestamento e a agrobiodiversidade (BIGGS *et al.*, 2015).

Como se pode perceber, desde a definição de desenvolvimento sustentável pelo relatório *Brundtland* (CMMAD, 1987), o conceito de sustentabilidade agrícola tem evoluído gradualmente (VAN CAUWENBERGH *et al.*, 2007). Desse modo, o paradigma do desenvolvimento sustentável tem sido bastante discutido no contexto agrícola por diversos motivos, seja em busca de práticas menos agressivas à natureza ou à saúde do homem, pelas mudanças no clima, tecnologias, políticas e preços, as quais afetam o desenvolvimento rural, fazendo com que os agricultores procurem aderir a novos sistemas de produção.

Os próprios sistemas agrícolas estão sofrendo porque os ativos naturais essenciais que devem ser abundantes estão frequentemente sendo reduzidos. Logo, existe a busca de melhorias nos processos de produção de agriculturas em todas as partes do mundo. Em muitos sistemas, o desafio está somente em aumentar a produção de alimentos para resolver problemas imediatos de fome. Em outros, o foco está relacionado a ajustes que visam manter a produção de alimentos ao mesmo tempo em que aumentam o fluxo de bens e serviços ambientais (PRETTY, 2008).

Os padrões de uso da terra e a mudança do uso da terra são críticos para o desenvolvimento sustentável. Os decisores políticos e as partes interessadas envolvidas no planejamento agrícola exigem, portanto, avaliações de impacto que integrem as dimensões econômica, social e ambiental para o melhoramento do uso da terra (REIDSMA, 2015).

O desenvolvimento da agricultura tem sido questionado quanto aos níveis de sustentabilidade, sobretudo em virtude da ampla modernização decorrente de princípios e práticas difundidos pela revolução verde (SILVA; CANDIDO, 2015). Para Correa (2007, p.

20), “a agricultura se caracteriza por ser uma das atividades humanas mais impactantes na natureza, destruindo e substituindo ecossistemas naturais e degradando e exaurindo recursos naturais importantes como o solo e a água”.

Mais recentemente, diversos esforços têm sido feitos para tornar operativo o conceito de sustentabilidade agrícola. As inovações em sistemas de manejo agrícola exigem formas para avaliar e para incentivar os esforços em busca de uma maior sustentabilidade ecológica, social e econômica (MASERA; ASTIER; LÓPEZ-RIDAURA, 1999).

Destarte, entender o significado do desenvolvimento sustentável no contexto de uma agricultura sustentável para as comunidades rurais, agricultores familiares e sistemas de produção rurais diversos, é compreender que o manejo deve ocorrer de forma que não se degrade os recursos naturais essenciais para manter a sobrevivência do sistema como um todo. Portanto, torna-se pertinente o estudo da sustentabilidade no meio agrícola.

2.2. SUSTENTABILIDADE AGRÍCOLA

O desenvolvimento da agricultura tem se tornado um grande questionamento em relação aos níveis de sustentabilidade, em decorrência das práticas difundidas pela modernização, baseadas no uso intensivo de produtos agroquímicos e de fertilizantes, prejudicando a qualidade do solo e da água para a obtenção de um maior rendimento agrícola, sem se preocupar com os recursos naturais e a reprodução social dos agricultores, o que corrobora para a falta de manutenção da capacidade de sobrevivência das próximas gerações e por sua vez para a insustentabilidade no meio agrícola.

Nesse sentido, para que haja a sustentabilidade da agricultura deve ocorrer a aplicação de um conjunto de boas práticas, da preservação dos recursos naturais e da biodiversidade, do desenvolvimento de habilidades e capacidades especializadas, bem como, ao respeito das escolhas dos agricultores em um determinado contexto social, econômico e ambiental (PERROT *et al.*, 2016).

Encontram-se na literatura denominações diversas para esse tipo de agricultura: alternativa, orgânica, biodinâmica, biológica, permacultura. Criadas em épocas definidas, seus idealizadores propunham em comum a concepção basilar como sendo a busca de um manejo de base ecológica, gerador de produtos mais saudáveis e com uma mínima dependência de insumos externos industrializados, buscando uma maior equidade social (CORREA, 2007).

No que concerne à agricultura, verifica-se que é considerada a principal fonte de sustento dos países em desenvolvimento com mais de 75% das pessoas pobres dependentes da agricultura para viver (PHAM; SMITH, 2013). A implementação e avaliação da agricultura sustentável tornou-se um dos principais desafios para a investigação, a prática e as políticas agrícolas (VAN CAUWENBERGH *et al.*, 2007). As políticas públicas de apoio à agricultura têm sido criticamente importantes para influenciar a transformação dos setores agrícolas. Entretanto, poucos deles têm se dedicado a melhorar os serviços ecossistêmicos além das commodities agrícolas (PLIENINGER *et al.*, 2012).

A agricultura tem sido identificada como uma forma prejudicial para a biodiversidade, causando perda de habitat, degradação e fragmentação, bem como implementação de cargas de nutrientes excessivas. Os principais impactos ambientais são o aumento do uso de fertilizantes e pesticidas, bem como a intensificação dos sistemas de produção animal, o escoamento de sedimentos por erosão e a perda de mosaicos tradicionais de paisagem (PLIENINGER *et al.*, 2012)

Ao longo do século passado, a atividade agrícola se intensificou em todo o mundo e se caracteriza por uma crescente dependência de insumos externos e na conversão da terra. Embora a intensificação agrícola tenha aumentado a produtividade, a sustentabilidade dos agroecossistemas diminuiu e, portanto, a sua capacidade de atender às necessidades humanas sem comprometer a saúde dos ecossistemas (DI FELICE *et al.*, 2012).

A produção agrícola depende da disponibilidade e gestão dos recursos, tais como mão de obra, capital, maquinaria, combustível, solo, sementes, água, nutrientes, resíduos de colheita, adubo e pesticidas (BRUSSAARD; RUITER, BROWN, 2007). Nesse contexto, verifica-se que a agricultura convencional altera fortemente a qualidade do solo devido a práticas industriais que muitas vezes têm efeitos negativos na vida do solo.

Sistemas alternativos como a agricultura de conservação e a agricultura biológica poderiam restaurar melhores condições para os organismos do solo (HENNERON *et al.*, 2014). Nesse sentido, as práticas agrícolas geralmente incluem lavoura pesada, manejo de resíduos prejudiciais e aplicação de pesticidas. No entanto, com a adoção de sistemas de agricultura sustentáveis, pode-se potencialmente restaurar as condições mais favoráveis da produção agrícola.

A agricultura sustentável é definida como a gestão e utilização do ecossistema agrícola de forma a manter sua diversidade biológica, produtividade, regeneração, capacidade, vitalidade e capacidade de funcionamento, de modo que possa cumprir - hoje e no futuro -

importantes funções ecológicas, econômicas e sociais nos níveis local, nacional e global e não prejudique outros ecossistemas (VANCAUWENBERGH *et al.*, 2007).

A sustentabilidade agrícola está relacionada com o período de tempo desejável para a produção de culturas; o prazo em que os recursos são renovados ou permanecem disponíveis em níveis que permitem atingir essa produção; e o prazo dentro do qual a agricultura permanece financeiramente suficientemente rentável para sustentar os meios de subsistência dos agricultores (BRUSSAARD; RUITER, BROWN, 2007).

A sustentabilidade nos sistemas agrícolas também incorpora os conceitos de resiliência (capacidade dos sistemas de amortecer choques e tensões) e de persistência (a capacidade dos sistemas de continuar durante longos períodos), e aborda as dimensões econômicas, sociais e ambientais (PRETTY, 2008). Destarte, esse tipo de agricultura deve reconhecer a natureza sistêmica da produção de diversas culturas, equilibrando, com equidade, preocupações relacionadas à saúde ambiental, à justiça social e à viabilidade econômica, incluindo distintos povos e diferentes gerações (GLIESSMAN, 2009).

Nesse contexto, a compreensão de uma agricultura sustentável surge diante da impossibilidade de se dar continuidade às formas vigentes de produção, que vêm exercendo grandes pressões sobre o meio ambiente, e sendo bastante questionada, por ser prejudicial à saúde da população consumidora de alimentos produzidos com o uso excessivo de agrotóxicos, tema veemente difundido pela revolução verde.

A busca de sistemas de produção agrícolas sustentáveis, com baixo uso de insumos externos, diversificados e eficientes, constitui a principal preocupação de pesquisadores, agricultores e formuladores de políticas em toda parte do mundo. Produzir sustentavelmente a longo prazo, por meio do uso de práticas ecologicamente seguras requer que a agricultura seja vista como um ecossistema e que as práticas agrícolas e a pesquisa não se preocupem com altos níveis de produtividade de uma mercadoria em particular, mas, sim, com a otimização do sistema como um todo (ALTIERI, 2004).

Do ponto de vista da agroecologia, a agricultura sustentável, é tida como aquela que tem uma compreensão holística dos agroecossistemas, sendo capaz de atender aos seguintes critérios: baixa dependência de inputs comerciais; uso de recursos renováveis localmente acessíveis; utilização dos impactos benéficos do meio ambiente local; aceitação e/ou dependência da intensa alteração ou tentativa de controle sobre o meio ambiente; manutenção, em longo prazo, da capacidade produtiva; preservação da diversidade biológica e cultural; utilização do conhecimento e da cultura da população local e produção de mercadorias para o consumo interno e para a exportação (GLIESSMAN, 1995, CAMELO; CANDIDO 2015).

Portanto, a agricultura moderna enfrenta agora o desafio de desenvolver sistemas sustentáveis que busquem a intensificação da produção ao mesmo tempo em que mitiguem seus impactos ambientais. Este novo paradigma agrícola baseia-se na substituição do uso de insumos artificiais por uma melhor gestão dos processos ecológicos, a fim de auto-regulação dos agroecossistemas (ALTIERI 2005; HENNERON *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a implementação e avaliação da agricultura sustentável tornou-se um grande desafio para a pesquisa, prática e política da produção agrícola, e nessa perspectiva, torna-se preponderante a fundamentação da temática de agroecossistemas para se compreender a importância atrelada ao manejo desses sistemas de forma produtiva e sustentável.

2.3. AGROECOSSISTEMAS

Os agroecossistemas têm se destacado em estudos sobre sustentabilidade na agricultura, tendo em vista enfatizarem a necessidade de baixo uso de insumos advindos do meio externo, buscando assegurar uma produtividade capaz de ser sustentada a longo prazo por meio de um manejo ecologicamente seguro.

O termo agroecossistema está relacionado a uma propriedade agrícola, uma lavoura, em sua multidimensionalidade, sendo compreendido como um ecossistema modificado em suas múltiplas dimensões espaçotemporais, que se tem aproximado da ecofisiologia do sistema natural (ALTIERI, 2004). Esse conceito contribui de forma significativa para o debate sobre agricultura sustentável, apoiando-se, para tanto, na necessidade de percepção sistêmica dos processos produtivos (SILVA; CANDIDO, 2015)

Nesse sentido, compreender um agroecossistema como um sistema de produção agrícola que envolve todos os organismos da sua estrutura de forma interativa, proporciona a visualização das relações ecológicas, sociais e econômicas de modo que se preserve o ecossistema utilizado.

No que concerne à criação de um agroecossistema, pode-se considerar que ocorre a partir do momento em que o ecossistema é alterado com o propósito de desenvolver uma dada produção agrícola, introduzindo várias mudanças na estrutura e função do ecossistema natural, mudando o estado inicial do sistema (GLIESSMAN, 2009). Logo, os agroecossistemas podem ser definidos como um ecossistema gerenciado com a intenção de

produzir, distribuir e consumir. Suas fronteiras abrangem o espaço físico dedicado à produção, bem como os recursos, infra-estrutura, mercados, instituições e agricultores. Logo, os agroecossistemas operam simultaneamente em múltiplas escalas e hierarquias aninhadas, do campo ao globo (CABELL; OELOFSE, 2012, P.2)

Os agroecossistemas também podem ser definidos como sistemas de gestão de recursos destinados à produção agrícola ou florestal. A necessidade de reduzir os seus impactos e seus riscos para a saúde humana tem levado a um trabalho substancial em estratégias como a redução ou substituição de fertilizantes sintéticos e pesticidas, a reintrodução de práticas tradicionais como intercalação e aplicação integrada de fertilidade e controle de pragas, além de estratégias, a fim de reduzir as perdas de energia, nutrientes e econômicas (ASTIER *et al.*, 2011).

Os agroecossistemas têm dimensões biofísicas e socioeconômicas e representam uma interação dinâmica entre pessoas, componentes bióticos e abióticos dos solos subjacentes, terras adjacentes que sustentam plantas e animais que ocorrem naturalmente e terras adjacentes administradas por pessoas para outros fins que não a produção de alimentos (VADREVU *et al.*, 2008).

Os agroecossistemas são vitais para o fornecimento de serviços ecossistêmicos à sociedade humana, mas a maioria das práticas agrícolas tradicionais tem um impacto negativo no meio ambiente (PLIENINGER *et al.*, 2012). Destarte, a compreensão dos agroecossistemas é necessária para que haja a manutenção da produtividade agrícola minimizando os problemas ambientais (ROBOREDO; BERGAMASCO; BLEICH, 2016)

A integração de produção deculturas diversas, que no passado garantiram a diversidade necessária para a estabilidade dos agroecossistemas, foi perdida e, além disso, o uso da terra tem sido bastante sacrificado para expandir monoculturas ou para uso exclusivo para a pecuária. A diversidade agrária deteriorou-se, significativamente, em uma perda considerável de sustentabilidade (GUZMÁN; MOLINA; ALONSO, 2011).

Para se garantir a segurança alimentar de toda a população mundial e a conservação dos recursos naturais, como requer a definição de sustentabilidade, é necessário que se tenha um conhecimento sistêmico que integre o saber específico do convencional ao conhecimento sistêmico, associando os vários componentes de um agroecossistema (EHLERS, 1999, CAMELO; CANDIDO, 2015).

Gliessman (2005, p.565) define um agroecossistema sustentável da seguinte forma:

Descrevemos um agroecossistema sustentável como o que mantém a base de recursos da qual depende, conta com um uso mínimo de insumos artificiais vindos de fora do sistema de produção agrícola, maneja pragas e doenças através de

mecanismos reguladores internos e é capaz de se recuperar de perturbações causadas pelo manejo e colheita.

Segundo Altieri (2004, p.154),

Um ponto-chave no desenho de agroecossistemas sustentáveis é a compreensão de que existem duas funções no ecossistema que devem estar presentes na agricultura: a biodiversidade dos microrganismos, plantas e animais e a ciclagem biológica de nutrientes da matéria orgânica.

A biodiversidade é significativa para os agricultores neste contexto, uma vez que compreende a "biodiversidade planejada", isto é, as culturas e / ou animais que o agricultor deseja produzir, e também a biodiversidade "não planejada", isto é, todas as outras biotas que entram no sistema. A biota pode ser considerada benéfica, como insetos polinizando a cultura, ou prejudicial, como patógenos, pragas e ervas daninha. Tal gestão do planejamento é direcionada para a eliminação ou promoção de processos populacionais (por exemplo, controle de pragas) ou de processos ecossistêmicos, que estão associados com diversidade de espécies e diversidade de grupos funcionais, respectivamente (BRUSSAARD; RUITER, BROWN, 2007).

Dessa forma, a biodiversidade contribui para a produtividade, sustentabilidade e estabilidade dos sistemas agrícolas, independentemente do nível de complexidade do ecossistema em que ocorre. A diversidade de espécies de culturas e animais tem sido associada ao uso mais eficiente dos recursos naturais resultando na resiliência e sustentabilidade em agroecossistemas (VADREVU *et al.*, 2008).

Nesse contexto, aplicando-se o conceito de desenvolvimento sustentável aos sistemas de gestão de recursos naturais, estes devem obedecer a sete atributos, a serem considerados sustentáveis (MARZALL; ALMEIDA, 2000; ASTIER *et al.*, 2011), quais sejam:

- Elevado nível de **produtividade** por meio de um uso eficiente e sinérgico dos recursos naturais e econômicos, ou seja, a capacidade do agroecossistema de prover o nível adequado de bens, serviços e retorno econômico aos agricultores num determinado período de tempo;
- **Estabilidade, confiabilidade e resiliência**, referentes à presença e efetividade dos processos de feedback negativo que permitem a manutenção de um estado de equilíbrio dinâmico em nível de produtividade constante, em condições normais, de choque ou de estresse (secas, inundações, quebras de colheita, elevação de custos etc.), retornando ao estado de equilíbrio;

- **Adaptabilidade** para lidar com as mudanças das condições socioambientais , ou seja a capacidade do sistema de manter ou encontrar novos níveis de equilíbrio – continuar sendo produtivo – diante de mudanças de longo prazo nas condições econômicas, biofísicas, sociais, técnicas etc.;
- **Equidade** na distribuição de custos e benefícios entre os diferentes usuários de recursos, ou seja, a capacidade do agroecossistema de gerir de forma justa sua força produtiva (material e imaterial), inclui divisão social e técnica do trabalho familiar, relações de gênero e de geração, relações com os processos sociopolíticos e serviços ambientais;
- **Auto-suficiência**, implicando independência e auto-suficiência suficientes para manter seu desempenho apesar da ocorrência de mudanças externas. Logo, é a capacidade do sistema de regular e controlar suas relações com o exterior (bancos, empresas de insumos, atacadistas, agroindústria, atravessadores etc.); inclui os processos de organização social e de tomada de decisões, e a capacidade para definir internamente as estratégias de reprodução econômica e técnica, os objetivos, as prioridades, a identidade e os valores do sistema.

Do ponto de vista da produtividade, a nível local ou agrícola individual, é necessária uma certa quantidade de terra para obter energia e nutrientes suficientes para satisfazer as necessidades do processo de produção. Do ponto de vista da estabilidade e da resiliência, a biodiversidade desempenha um papel crucial não só no controle de pragas e doenças, mas também na estabilidade dos rendimentos (GUZMÁN; MOLINA; ALONSO, 2011).

Esses atributos são, geralmente, utilizados por pesquisadores acadêmicos como meios expressivos para se medir e avaliar o nível de sustentabilidade em agroecossistemas em alguns sistemas de indicadores de sustentabilidade voltados para os sistemas de produção agrícola.

Existem abordagens que oferecem uma boa estrutura para derivar indicadores, porém as estruturas existentes mostram limitações quando aplicadas aos sistemas de produção agrícola. De fato, estruturas baseadas em sistemas que avaliam a sustentabilidade com base em atributos gerais do sistema (tais como produtividade, estabilidade, resiliência, etc.), fornecem uma estrutura de pensamento. Mas a falta de um conteúdo específico para os diferentes atributos requer um amplo conhecimento do sistema sob investigação para formular indicadores (VAN CAUWENBERGH *et al.*, 2007).

Tendo em vista a necessidade premente de melhorar a sustentabilidade dos agroecossistemas, vários esforços têm sido feitos para avaliar o efeito de estratégias alternativas sobre variáveis ambientais e socioeconômicas em comunidades rurais (GUZMÁN; MOLINA; ALONSO, 2011). Como parte da investigação científica quanto aos meios e métodos de avaliar a sustentabilidade, muitos trabalhos têm incorporado a discussão sobre quais os indicadores adequados para este fim (CORREA, 2007).

Cabe salientar que a avaliação da sustentabilidade de agroecossistemas deve abranger as dimensões ambiental, econômica e social do sistema. É necessário que haja a tomada de decisões estratégicas para manter a produtividade das terras agrícolas em face dos preços flutuantes do mercado, além de considerarem a sustentabilidade no contexto mais amplo das políticas agrícolas nacionais e dos incentivos à gestão do campo (DI FELICE *et al.*, 2012).

Métodos baseados em indicadores têm sido amplamente utilizados para avaliar a sustentabilidade agrícola (PHAM; SMITH, 2013). A maioria dos índices e indicadores de sustentabilidade é considerada como informações essenciais que auxiliam na avaliação do sistema em estudo, além de ser uma alternativa na construção de cenários no caminho da sustentabilidade (SICHE *et al.*, 2007). Os sistemas de indicadores de sustentabilidade implementados para avaliar os aspectos sociais, econômicos e ambientais dos agroecossistemas têm sido utilizados em estudos de diversas regiões do mundo (ASTIER *et al.*, 2011).

Nesse contexto, o foco do trabalho encontra-se na grande discussão em torno da sustentabilidade em agroecossistemas e dirige-se à utilização de métodos de sistemas de indicadores de sustentabilidade para que se possa otimizar a produtividade e equilíbrio de agroecossistemas. Diante dessa perspectiva, torna-se imprescindível fundamentar, a priori, os indicadores de sustentabilidade e os sistemas de indicadores sustentáveis em agroecossistemas com o intuito de compreender quais os principais sistemas de indicadores sustentáveis, no meio agrícola, que permitem mensurar e avaliar a sustentabilidade de agroecossistemas.

2.4. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

A definição de indicadores para avaliar os progressos no sentido da sustentabilidade proporciona a revelação das principais condições e tendências do sistema pesquisado, por meio da obtenção de dados e informações, contribuindo para que haja uma mensuração e

compreensão da realidade apresentada, e por sua vez, orientando na tomada de decisão acerca das medidas que proporcionem estados de sustentabilidade.

Os indicadores de sustentabilidade são importantes instrumentos de avaliação da sustentabilidade, quer isolados, combinados e condensados em forma de índices, quer ainda utilizados de forma estruturada, através dos modelos de avaliação de sustentabilidade (COSTA, 2010)

Os indicadores de sustentabilidade são caracterizados por se referir aos elementos relativos à sustentabilidade de um sistema. É fundamental que haja uma clara definição do que a organização, instituição de pesquisa, grupo ou indivíduo entende por sustentabilidade. A visão clara do objetivo relacionado à sustentabilidade é que estabelecerá o processo de interpretação dos resultados obtidos com a leitura do indicador (MARZALL; ALMEIDA, 2000).

Diante desse contexto, torna-se crucial fundamentar o que são indicadores a partir da sua definição para então compreender como são importantes para a avaliação da sustentabilidade. Originariamente, o termo indicadores vem do latim *indicare*, que significa descobrir, estimar, apontar ou proclamar. O indicador se constitui em uma ferramenta que possibilita a obtenção de dados ou informações sobre dada realidade espacial ou que procura descrever um processo específico ou um processo de controle (MASERA; ASTER; LOPES-RADURA, 1999).

Portanto, indicadores são variáveis que revelam condições e tendências, ajudando no desenvolvimento, no planejamento e na tomada de decisão. Assim, entende-se que os indicadores são certos atributos que servem para avaliar ou analisar a sustentabilidade. Ou melhor, são variáveis que procuram descrever, medir, o estado ou a alteração da condição de um atributo específico ou de controle, ou refletir sobre isso (MASERA; ASTER; LOPES-RADURA, 1999); SILVA; CANDIDO, 2015).

Índices ou indicadores funcionam como um sinal de alarme para manifestar a situação do sistema avaliado, pois são valores estáticos, isto é, dão uma fotografia do momento atual. Sabendo que a natureza e a economia são sistemas dinâmicos, os índices não captam certos fenômenos que ocorrem no sistema, como a mudança tecnológica ou a adaptabilidade dos sistemas sociais (SICHE *et al.*, 2007).

Algumas características importantes devem ser consideradas na definição dos indicadores, conforme Camino; Müller (1993, p. 49-50), Masera; Astier; Lopez-Ridaura (2000, p. 47) e Marzall (1999, p. 38-39); Deponti; Eckert; Azambuja (2002), o indicador deve:

- ser significativo para a avaliação do sistema;
- ter validade, objetividade e consistência;
- ter coerência e ser sensível a mudanças no tempo e no sistema;
- ser centrado em aspectos práticos e claros, fácil de entender e que contribua para a participação da população local no processo de mensuração;
- permitir enfoque integrador, ou seja, fornecer informações condensadas sobre vários aspectos do sistema;
- ser de fácil mensuração, baseado em informações facilmente disponíveis e de baixo custo;
- permitir ampla participação dos atores envolvidos na sua definição;
- permitir a relação com outros indicadores, facilitando a interação entre eles.

Nesse sentido, os indicadores podem comunicar ou informar sobre o progresso em direção a uma determinada meta, como, por exemplo, o desenvolvimento sustentável, mas também podem ser entendidos como um recurso que deixa mais perceptível uma tendência ou fenômeno, que não seja imediatamente detectável (HAMMOND, 1995 *apud* VAN BELLEN 2004).

Para Deponti, Eckert e Azambuja (2002, p.44), indicadores são “instrumentos que permitem mensurar as modificações nas características de um sistema” e assim avaliar a sua sustentabilidade. ” De acordo com os autores, para que a escolha de indicadores seja coerente com os propósitos da avaliação, é necessário ter clareza sobre: O que avaliar? Como avaliar? Por quanto tempo avaliar? Por que avaliar? De que elementos consta a avaliação? De que maneira serão expostos, integrados e aplicados os resultados da avaliação para o melhoramento do perfil dos sistemas analisados?

A clareza quanto aos aspectos acima é fundamental, pois são eles que deverão orientar a definição quanto ao tipo de indicador recomendado para o monitoramento do objeto proposto. Não são raros os casos em que atividades de monitoramento geram muitas informações que, posteriormente, são pouco utilizadas, o que pode talvez ser explicado pelo fato do indicador utilizado para o monitoramento não retratar os anseios do grupo diretamente relacionado com o objeto (DEPONTI; ECKERT; AZAMBUJA, 2002).

Um aspecto determinante, em uma avaliação de um sistema, é que não existe a possibilidade de determinar sua sustentabilidade considerando apenas um indicador ou indicadores que se refiram a apenas um aspecto do sistema. A sustentabilidade é determinada por um conjunto de fatores (econômicos, sociais e ambientais), e todos devem ser

contemplados no cálculo do índice de sustentabilidade através dos correspondentes indicadores (SICHE *et. al.*, 2007).

Um indicador de sustentabilidade constitui um instrumento que permite, a partir da sua interpretação, definir a condição de um sistema como sustentável ou não. Ele é apenas uma medida, cuja avaliação evidencia se o limite, estabelecido de acordo com os valores e objetivos que regem uma determinada realidade, foi ultrapassado ou respeitado (MARZALL; ALMEIDA, 2000, COSTA, 2010)

Os esforços para a avaliação da sustentabilidade encontrados na literatura baseiam-se majoritariamente em três enfoques: (a) elaboração de listas de indicadores com carácter ambiental, social ou econômico, sem método de integração dos resultados da análise; (b) proposição de índices para qualificação da sustentabilidade de um sistema particular de maneira unívoca, sem detalhar a complexidade em identificar os aspectos mais importantes do sistema, e (c) proposição de metodologias de definição de critérios ou indicadores a serem utilizados na avaliação (MASERA; LÓPEZ-RIDAURA, 2000).

Vale salientar que as mudanças ocorridas no decorrer do tempo influenciam o conhecimento científico e aumentam os valores sociais, originando a necessidade de indicadores diferentes. Por outro lado, não existindo indicadores previamente definidos, a sua identificação acentua, obviamente, o carácter subjetivo da seleção e, portanto, da avaliação da sustentabilidade. Para ultrapassar esta lacuna, Masera et al. (2000) propõem que a seleção de indicadores deve ser realizada por uma equipe multidisciplinar, baseada na seleção participativa dos envolvidos na avaliação (COSTA, 2010).

Diante da contextualização sobre indicadores de sustentabilidade, é fundamental uma maior compreensão sobre os principais sistemas de indicadores existentes para avaliar a sustentabilidade, especialmente em agroecossistemas. Portanto, torna-se pertinente abordar os sistemas de indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas, enfatizando, a priori, sobre a importância de se ter essas ferramentas para estabelecer indicadores em relação aos sistemas de produção agrícolas, apresentando as vantagens para a avaliação da sustentabilidade, para em seguida, apresentar os principais sistemas de indicadores em agroecossistemas, conforme pode ser visto no próximo tópico.

2.4.1. Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas

A seleção e construção de indicadores para identificar o nível de sustentabilidade em agroecossistemas contribuem como base para uma compreensão holística dos desafios e incoerências presentes nas tentativas de desenvolvimento da agricultura, possibilitando, dessa forma, a verificação de oportunidades de mudança no processo produtivo no que tange às técnicas, inovações, práticas e políticas relacionadas aos fatores ambientais, sociais e econômicos.

Os questionamentos que ocorrem em torno da sustentabilidade voltam-se para a construção de indicadores que sejam capazes de mensurar as modificações nas características de um agroecossistema - objetivando diagnosticar como ele se apresenta em relação à sustentabilidade (CAMELO; CANDIDO, 2015).

Estabelecer indicadores, especialmente a nível de explorações agrárias, apresenta como vantagens a melhor definição de políticas de âmbito local; a avaliação das consequências de processos que afetam o ambiente; e a possibilidade de examinar os ecossistemas desde uma perspectiva local à global.

Os indicadores podem, assim, apresentar distintas utilidades, como a investigação básica ou como instrumentos para a aplicação de políticas agrárias ou, simplesmente, para gerar pontos de reflexão e servir como instrumentos de tomada de decisão do próprio agricultor e sua família (Navarro, 2002 *apud* COSTA, 2010).

As metodologias de avaliação da produtividade dos sistemas agrícolas sempre foram utilizadas. No entanto, como afirma Masera e López-Ridaura (2000, p.3-4),

Infelizmente, as experiências dos agricultores são geralmente subestimadas e muitas vezes competem desfavoravelmente com os sistemas convencionais quando os critérios apenas de curto prazo monetário são utilizados. Por isso, é urgente desenvolver estruturas alternativas para pesar claramente os benefícios e impactos de diferentes aspectos dos sistemas, tanto em produtividade e rentabilidade como os seus níveis de confiabilidade, resiliência, estabilidade, adaptabilidade, igualdade e autogestão relacionadas.

Os indicadores medem condições específicas do agroecossistema que são necessárias à sustentabilidade de forma a determinar o nível ou condição que esses parâmetros devem manter para funcionar de maneira sustentável (GLIESSMAN, 2005).

A seleção de um conjunto de indicadores deve servir para avaliar o sistema e possibilitar seu monitoramento no tempo a fim de fornecer informações que demonstrem se o sistema de manejo é sustentável; além disso, deve permitir a identificação dos aspectos que

precisam ser modificados ou melhorados. Para Gliessman (2005, p.566), os indicadores permitem “prever se um determinado agroecossistema pode, ou não, ser sustentável a longo prazo, e desenhar agroecossistemas que tenham a melhor chance de se mostrar sustentáveis”.

A partir da utilização de indicadores de sustentabilidade em agroecossistema pode-se avaliar as estruturas (disponibilidade de recursos, acessibilidade, diversidade e equidade), funcionamento (produtividade, eficiência, eficácia), organização (integridade / coerência, auto-organização, autonomia, autossuficiência, ou critérios dinâmicos (estabilidade, resiliência, capacidade e tempo para responder) (VADREVU *et al.*, 2008).

Uma alternativa para facilitar o entendimento dos agroecossistemas é o uso de um índice que incorpore a multidimensionalidade do espaço pesquisado, envolvendo variáveis quantitativas e / ou qualitativas, padronizadas e sintetizadas num número que indica o nível de sustentabilidade do território estudado (SEPÚLVEDA, 2008).

Este índice é constituído por indicadores de sustentabilidade, que são ferramentas essenciais na identificação de problemas e na busca da sua solução, através da participação e percepção das pessoas que vivem na área pesquisada (GUIMARÃES; FEICHAS, 2009). Os indicadores mostram o estado de saúde do agroecossistema, o que significa que refletem o status quo do nível de sustentabilidade.

Os indicadores utilizados para o monitoramento das unidades de produção devem ser sensíveis aos métodos de manejo e também compatíveis com um período de tempo propício à verificação (VADREVU *et al.*, 2008). Dessa forma, serão demonstrados os principais sistemas de indicadores utilizados para avaliação da sustentabilidade em agroecossistemas no tópico seguinte.

2.4.1.1. Principais sistemas de indicadores em agroecossistemas

Quadro 1. Métodos para a construção de indicadores e avaliação da sustentabilidade agrícola

Metodologias	Descrição
<i>Sostenibilidad de La agricultura y los recursos naturales: bases para establecer indicadores</i>	Propõe uma metodologia sistêmica, realizada em quatro etapas, para a avaliação da sustentabilidade, inicia-se pela definição do sistema a ser analisado e pelos aspectos que se consideram significativos do ponto de vista da sustentabilidade (categorias e elementos). Posteriormente, identificam-se e selecionam-se os descritores, que são as características de um elemento de acordo com os principais atributos de sustentabilidade de um dado sistema. Finalmente, definem-se os indicadores considerados como uma medida do efeito da operação do sistema

	sobre o descritor.
FESLM- <i>Framework for the Evaluation of Sustainable Land Management</i>	A sustentabilidade é avaliada para tipos definidos de uso da terra, referida a locais específicos, relativa a um intervalo de tempo definido, relevante para o contexto físico, econômico e social das áreas envolvidas, e uma atividade multidisciplinar.
MESMIS- <i>Marco para La evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales mediante indicadores de sustentabilidad</i>	O MESMIS parte de um conjunto de pressupostos para a avaliação da sustentabilidade, definindo a sustentabilidade pelos sete atributos gerais de agroecossistemas (produtividade, estabilidade, resiliência, confiança, adaptabilidade, equidade, e autonomia) sendo válidos para sistemas de produção específicos em um determinado contexto político, com escala espacial e temporal determinada, e contemplar uma visão multidisciplinar, sendo uma atividade participativa, por meio da qual se promove a discussão e retroalimentação de avaliadores e avaliados. Além disso, a metodologia permite a realização de comparações entre sistemas para se identificar qual o mais sustentável.
IDEA- <i>Indicateurs de durabilite des exploitations agricoles</i>	Consiste numa proposta metodológica para avaliação da sustentabilidade em explorações agrárias, publicado sob a forma de guia de utilização. Trata-se de um autodiagnóstico ou diagnóstico de sustentabilidade que faz emergir as forças e fraquezas do sistema de produção, bem como as pistas de evolução possíveis.
INDIGO- <i>Indicateur de diagnostic global a La parcelle</i>	Consiste numa avaliação do impacto ambiental das práticas agrárias, através de uma tabela que comporta cerca de dez indicadores agroambientais (azoto, pesticidas, fósforo, irrigação, matéria orgânica, energia, afolhamento, rotação, cobertura do solo), com valores compreendidos entre zero (risco forte) e dez (risco muito limitado). O valor recomendado é de sete, que corresponde ao risco mínimo que pode ser assumido de maneira realista quando aplicadas as recomendações das práticas de proteção integrada.
SAFE- <i>Sustainability assesment of farming and the environment</i>	Este projeto propõe uma aproximação holística para a avaliação da sustentabilidade na agricultura, integrando todos os fatores que influenciam e que são influenciados por esta atividade, baseada nas suas múltiplas funções desempenhadas nos ecossistemas onde é praticada, desde a produção alimentar até às funções relativas à conservação do solo, água, paisagem e biodiversidade.
IDS (S ³) – Índice de Desenvolvimento Sustentável.	A primeira versão IDS (S ³), biograma surgiu em 1988, elaborada pelo Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA), para avaliar o desenvolvimento sustentável de territórios na América Latina. Foi revisada em 2005 (Sepúlveda) com aplicação para avaliar a sustentabilidade do México. No Brasil, esse instrumento de avaliação foi aplicado por Waquil et al. (2010) para analisar os níveis de desenvolvimento sustentável dos territórios das regiões Sul e Sudeste.

Fonte: Elaborado com base em Costa (2010).

Dessa forma, a avaliação da sustentabilidade a partir desses grupos de indicadores permitirá ao pesquisador e ao agricultor uma compreensão atual do agroecossistema, um panorama futuro e as necessidades e possibilidades de mudança. A partir disso, o agricultor terá em mãos escolhas que poderão levá-lo ao caminho da sustentabilidade e melhorar o cenário ambiental, social e econômico da agricultura familiar (CORREA, 2007).

Nessa perspectiva, cabe destacar o método IDS (S^3), tendo em vista ser o instrumento selecionado como base para a otimização de agroecossistemas nesta dissertação, na medida em que a sua aplicação contribui para a identificação de níveis de sustentabilidade, e por sua vez, de uma gestão atrelada ao aumento da produtividade, considerando que o desempenho alcançado na escala local deve estar em harmonia com as dimensões sociais, econômicas e ambientais, e que se sustente durante longo prazo.

2.5. ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (S^3)

O Índice de Desenvolvimento Sustentável (S^3) é uma ferramenta de avaliação da sustentabilidade, utilizada para medir, quantitativamente, o nível de sustentabilidade de unidades de análise, tendo como fundamentos o conceito de desenvolvimento sustentável e metodologia interdisciplinar, os quais corroboram para melhores decisões sobre produção agrícola por parte das pessoas diretamente envolvidas em um processo de transformação do sistema avaliado no que tange às práticas e estratégias implementadas para uma gestão sustentável.

Esse instrumento traz em seu enfoque metodológico conceitual uma perspectiva multidimensional do processo de desenvolvimento sustentável, partindo da definição de indicadores como instrumentos com os quais se podem mensurar os diversos índices de desenvolvimento de cada unidade de análise com enfoque comparativo, pois, quando analisados integrados, esses índices formam o Índice de Desenvolvimento Sustentável – IDS (S^3) da unidade de análise (SEPÚLVEDA, 2008).

Nesse sentido, o IDS (S^3) é frequentemente utilizado para avaliar o nível de sustentabilidade, na medida em que utiliza o enfoque sistêmico – escalar, multidimensional e intertemporal –, configurando com o Relatório *Brundtland*, em que o desenvolvimento sustentável deve abordar questões que dizem respeito à avaliação de desenvolvimento rural

sustentável, tendo como foco a relação homem-natureza atrelada a propriedades como: sustentabilidade (resiliência), competitividade (produtividade), sociabilidade (equidade) e autonomia (governabilidade), além de permitir a definição de indicadores, num período evolutivo ou não (REIS, 2013).

De acordo com Sepúlveda (2008), a descrição dos passos, abaixo, permite a melhor compreensão do processo de avaliação da sustentabilidade implementado por esse instrumento.

1. Fazer o recorte geográfico e definir a unidade de análise (UA);
2. Definir o recorte temporal (OT);
3. Definir dimensões de análise (DA);
4. Definir indicadores e fundamentá-los teoricamente;
5. Definir função relação: se positiva: (+) ou negativa (-);
6. Escolher o método biograma: 1- valores observados, 2- limites de flutuação e 3-níveis ótimos;
7. Calcular nível máximo, mínimo e média;
8. Índice.

Para cada indicador é estabelecida uma função relação positiva ou negativa. Logo, o aumento do valor do indicador reflete situação melhor ou pior do estado de sustentabilidade. Por exemplo: para um índice de valores entre 0 e 1, quanto mais alto for seu valor, melhor será o estado de sustentabilidade da unidade de análise (UA). Sendo assim, um indicador de taxa de empregabilidade, tendo relação positiva com o processo de equidade social, terá um índice tão mais alto quanto mais alto for seu valor. O contrário pode ocorrer com o número de baixa taxa de empregabilidade. Ou seja, quanto maior for seu valor, menor será o índice, uma vez que o desemprego tem relação negativa com a equidade social (REIS, 2013).

A função relação é diferenciada pelos sinais + (positivo) e - (negativo), sendo representada por meio das seguintes equações:

Equação 1 – Função relação positiva do índice

$$f(x) = \frac{x - m}{M - m} \quad (1)$$

Equação 2 – Função relação negativa do índice

$$f(x) = \frac{x-M}{(m-M)} \quad (2)$$

Logo, verifica-se que nas equações 1 e 2, o x é o valor correspondente à variável ou ao indicador; o m representa o valor mínimo da variável e o M demonstra o nível máximo da variável, observados num determinado período de tempo (SEPÚLVEDA, 2008).

Nessa perspectiva, cabe salientar que os índices de sustentabilidade podem ser avaliados de diferentes maneiras: unidade de análise, ou território, dimensões ou indicadores representativos das dimensões. (SEPÚLVEDA, 2008). Essas dimensões da sustentabilidade contextualizadas por meio de indicadores são consideradas a base para avaliar a sustentabilidade e representá-la como índice ou no gráfico biograma. O S^3 , biograma é um conjunto de ferramenta complementar que permite representar, em relação a um período determinado, o índice de desenvolvimento sustentável da unidade análise (REIS, 2013).

Nesse contexto, pode-se ressaltar que o índice de sustentabilidade da unidade de análise avaliada é obtido calculando-se a média aritmética de seus indicadores, e a partir dos valores encontrados dos índices de sustentabilidade, chega-se ao S^3 , através da média harmônica dos três valores de cada dimensão da sustentabilidade.

Além do cálculo S^3 e da representação biograma, considerado como instrumento complementar, há cinco cores padronizadas que, de acordo com Sepúlveda (2008), permitem tornar mais fácil a leitura e a compreensão do estado de sustentabilidade, conforme se verifica no quadro 2, abaixo:

Quadro 2. Estado de sustentabilidade, conforme o IDS



Fonte: Adaptado de Sepúlveda (2008).

Assim, se o estado de sustentabilidade do agroecossistema estiver entre:

- 0,0 a 0,2 (cor vermelha) - indica estado de sustentabilidade em colapso;
- 0,2 a 0,4 (cor laranja) - indica estado de sustentabilidade crítico;
- 0,4 a 0,6 (cor amarela) - indica estado de sustentabilidade instável;
- 0,6 a 0,8 (cor azul) - indica estado de sustentabilidade estável;
- 0,8 a 1 (cor verde) - indica estado de sustentabilidade ótimo.

Diante da contextualização desse instrumento que possibilita encontrar resultados para a definição dos níveis de sustentabilidade de unidades de análise, nesse estudo, chamadas de agroecossistemas, torna-se preponderante compreender na literatura como se fundamenta a construção dos modelos matemáticos nesse ambiente, no que tange à utilização de indicadores de sustentabilidade que envolvam as três dimensões, e como essa associação contribui para a manutenção de níveis estáveis de sustentabilidade.

2.6. OTIMIZAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE EM AGROECOSSISTEMAS

A utilização de modelos matemáticos que envolvem a otimização da sustentabilidade em agroecossistemas, é, geralmente, empregada para encontrar soluções que maximizem a produção ou que minimizem custos na agricultura, tendo como variáveis as dimensões da sustentabilidade envolvidas no processo de gestão do uso das terras, emissão de poluentes, mudanças climáticas, uso de produtos químicos, geração de emprego, entre outros.

Em um processo de modelagem matemática, o primeiro passo a se fazer é identificar os cenários possíveis, seguidos de uma comparação entre si, e finalmente a seleção do cenário mais preferível, com base na experiência do grupo. Percebe-se que a incerteza associada a problemas de sustentabilidade é freqüentemente difundida, o que se deve a informações incompletas ou imprecisas e à falta de conhecimento profundo sobre as interações das unidades de análise dentro do sistema produtivo ou com o meio externo envolvido (LIU; HUANG, 2015).

Como já foi visto, o desenvolvimento sustentável é aquele que atende aos requisitos da geração atual sem enfraquecer as habilidades das próximas gerações de atender às suas próprias necessidades. Nesse sentido, pode-se assumir que a sustentabilidade no que tange à modelagem matemática é uma equação entre necessidades e requisitos econômicos, ambientais e sociais (GHADERI, 2016).

Desse modo, para que haja a efetivação da otimização da sustentabilidade em agroecossistemas, é necessário desenvolver modelos que utilizem as três dimensões (sociais, ambientais e econômicas). Para tanto, as soluções ótimas, geralmente, são determinadas para alcançar o nível mais elevado de melhoria da sustentabilidade, mantendo-se no limite das restrições escolhidas (LIU; HUANG, 2015).

Os cenários alternativos que visam a sustentabilidade podem ser identificados resolvendo problemas de otimização. Os problemas de otimização em sustentabilidade, quando formulados, são projetados para alcançar o melhor desempenho sustentável sob uma série de restrições de sistema (LIU; HUANG, 2015).

A otimização inclui um conjunto de atividades de melhoria contínua que podem oferecer a melhor solução ajustando um ou mais parâmetros (afetando o comportamento dos mesmos). Estes padrões são obtidos modelando e simulando um sistema. No que diz respeito às operações de produção sustentável, qualquer parâmetro relevante para o processo pode ser selecionado para melhoria da eficiência (desempenho econômico, ambiental ou social). No entanto, será necessário selecioná-los adequadamente e limitar o escopo da solução, uma vez que a melhoria em qualquer uma das três dimensões sustentáveis pode afetar as outras duas, de forma negativa ou positiva (ALVAREZ, BARCENA E GONZAGUES, 2016).

A otimização econômica, geralmente, é tida como um dos objetivos mais populares nas abordagens de modelagem. Porém, no que tange à otimização da sustentabilidade, deve-se ter como referência os modelos que apresentem os três pilares, quais sejam, econômicos, ambientais e sociais (GHADERI, 2016).

Na literatura encontram-se poucos modelos que incorporam as dimensões econômicas e sociais em conjunto com as dimensões ambientais. Quanto aos aspectos econômicos, os critérios de desempenho financeiro como custo, lucro ou valor presente líquido (VPL) foram considerados em muitos trabalhos (BOUKHERROUB *et al.*, 2015). Comumente são encontradas como função objetivo dos problemas de modelagem matemática, benefícios socioeconômicos de matéria-prima para os produtores e comunidades locais, a redução de gases de efeito estufa, a maximização do retorno econômico para os investidores, etc. Logo, são pouquíssimos os estudos que buscam otimizar questões com todas as dimensões da sustentabilidade (GARBIÉ, 2015).

Groot; Oomen; Rossing (2012) consideram que recentemente algumas abordagens de modelagem matemática, relativamente simples, para aplicação rural estão se tornando disponíveis para o manejo de agricultura, agropecuária e dinâmica da matéria orgânica do solo. Algumas dessas ferramentas concentram-se, por exemplo, na dinâmica dos processos biológicos (modelagem dinâmica contínua), na gestão de fazendas (modelagem de eventos discretos, sendo freqüentemente construídas e aplicadas em ambientes participativos com agricultores em diversas áreas do mundo (TIXIER *et al.*, 2013).

Cabe salientar que a forma como um modelo é concebido para ajudar os agricultores na sua tomada de decisão pode influenciar a forma como é compreendida e percebida pelos

agricultores e também contribuem para uma melhor interação com os implementadores do modelo (SEMPORE *et al.*, 2015).

Como se pode verificar, a modelagem matemática utilizada para a sustentabilidade em agroecossistemas procura solucionar problemas de questões ambientais, sociais e econômicas cruciais para a manutenção da estabilidade e equilíbrio do sistema, evitando, assim, a ocorrência de alterações climáticas, desertificação, falta de água, consumo exacerbado de energia, de agrotóxicos e fertilizantes, custos altos e perda de produtividade, dentre outros. Dessa forma, serão mostrados no próximo tópico, alguns modelos de otimização implementados em agroecossistemas.

2.6.1. Modelos de otimização desenvolvidos em agroecossistemas

A literatura apresenta alguns trabalhos com o desenvolvimento de modelos matemáticos específicos na busca da otimização da sustentabilidade em agroecossistemas, valendo ressaltar, que poucos atendem às três dimensões da sustentabilidade ou utilizam-se de sistemas de indicadores sustentáveis para otimização, conforme será destacado, a seguir:

Quadro 3. Modelos utilizados para resolução de problemas sustentáveis em agroecossistemas

Modelo/Método	Problema/Objetivo	Solução	Autores
Ferramenta de otimização de PL multicritério para equilibrar os atributos sociais, ambientais e econômicos da oferta da cadeia de biomassa. Esses modelos são comumente usados para avaliação de trade-offs e para otimização de sistemas complexos.	Maximizar três funções objetivas: Benefícios econômicos: $Prof(it) = \sum_{i=1}^{16} P_i * E_i$ Benefícios econômicos e sociais: $Prof(it) + SocialBenefit = \sum_{i=1}^{16} [(P_i + S_i)] * E_i$ Benefícios econômicos, sociais e custos ambientais juntos: $Prof(it) + SocialBenefit - EnvironmentalCosts = \sum_{i=1}^{16} (P_i + S_i - E_{ni}) * E_i$	Cada atributo foi calculado separadamente e, em seguida, foram combinados para criar uma solução otimizada. A inclusão de todos os três atributos de sustentabilidade levou a uma solução otimizada diferente.	Radics; Dasmohapatra; Kelley (2016)
Modelo de programação linear de dois estágios inteiros mistos para a gestão	Modelo de 2 estágios: Maximizar a função: $\max f = cx - E [Q(x, \omega)]$ (1a)	As soluções ótimas mostram as competições entre três culturas.	Zhang; Guo (2017)

agrícola sob a incerteza considerando a exigência de água e da proteção ecológica	subject to (1b) $Ax \leq b \quad x \geq 0$ (1c); e Minimizar a função: $\min q(y, \omega)$ (1d) subject to (1e) $W(\omega)y = h(\omega) - T(\omega)x$ $y \geq 0$ (1f)	Indicando que os alvos de irrigação não são sensíveis às variações de exigências de água ecológica.	
Modelo SWAT- usado para quantificar as emissões de N ₂ O dos agroecossistemas, que ocorrem como resultado do ciclo do nitrogênio (N).	Minimizar funções para prever a desnitrificação total (N ₂ + N ₂ O) e as partições N ₂ de N ₂ O usando um método de razão. Ex. de uma função utilizada: $DN_{total} = \min [Fd(NO_3); Fd(C)] * Fd(\theta) * Fd(T) * Fd(pH)$	Aumentar a intensidade e a homogeneização dos recursos agrícolas e paisagens florestais.	Wagena, <i>et al</i> (2017)

Fonte: Elaboração Própria (2018).

Destarte, pode-se verificar que os modelos de otimização em agroecossistemas são relevantes no cenário da literatura atual, contribuindo para a manutenção da sustentabilidade. Nesse sentido, o modelo de otimização pode ser considerado de fundamental importância para a sustentabilidade em agroecossistemas, uma vez que há a possibilidade de uma melhor gestão dos recursos, reduzindo os impactos ambientais, sociais e econômicos por meio dos resultados encontrados que possibilitam a incorporação de melhorias técnicas em ambientes reais.

Diante do exposto sobre a otimização e sustentabilidade de agroecossistemas, torna-se imprescindível compreender de forma mais específica sobre os modelos matemáticos e as técnicas de otimização para a resolução de problemas que se relacionam ao modelo implementado nesse estudo, quais sejam, a programação não linear e a programação geométrica.

2.7. MODELAGEM MATEMÁTICA

Os modelos matemáticos são conhecidos como representações simplificadas de um ambiente real que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada, permitindo que as conclusões e interpretações obtidas possam ser estendidas à

realidade. Nesse sentido, torna-se imprescindível uma melhor abordagem sobre modelos, sua classificação e técnicas de resolução.

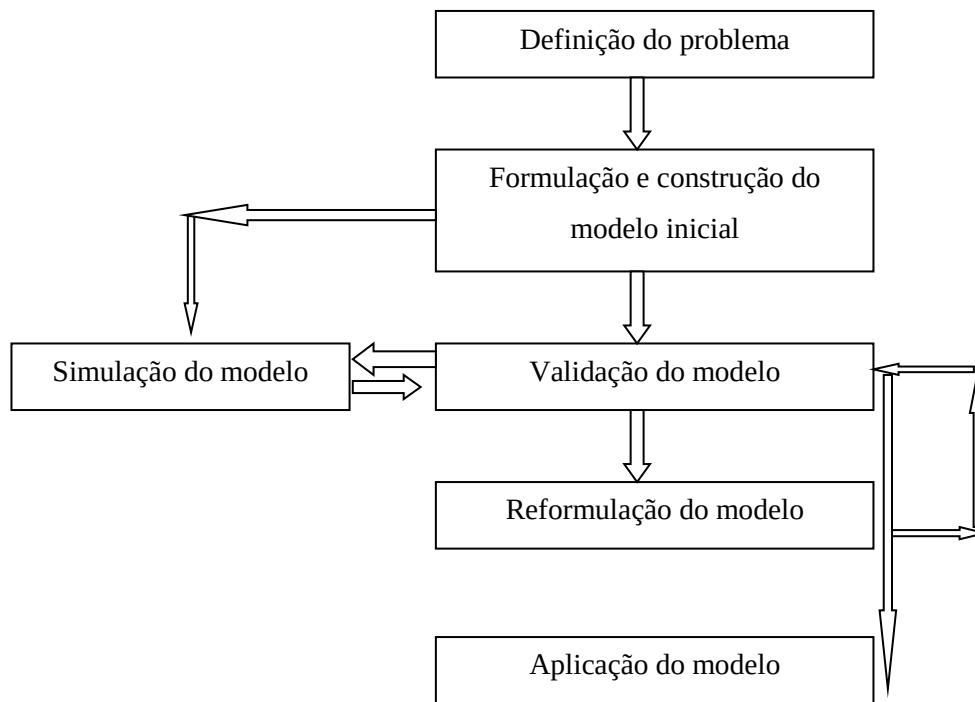
Nesse sentido, pode-se compreender que a matemática tem uma importância fundamental na descrição dos fenômenos naturais, sociais, econômicos, dos processos ou sistemas, na medida em que procura imitar as principais características de um objeto real para fins de representá-lo, dando origem aos modelos matemáticos (ARENALES *et al.*, 2007).

Um modelo não é igual à realidade, mas suficientemente similar para que as conclusões obtidas através de sua análise possam ser estendidas à realidade. Em consequência, para a formalização desse modelo é indispensável definir a estrutura relacional do sistema representado (desenhos ou símbolos), o comportamento funcional de cada subsistema ou componente (funções de desempenho), e os fluxos de relacionamento (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Os modelos podem ser classificados quanto à natureza como concretos (físicos, geométricos) e abstratos (matemáticos, lógicos e esquemáticos), quanto às propriedades como icônicos (fotografias, mapas); analógicos (substituição de sistemas hidráulicos por elétricos); e simbólicos (equações). Têm-se como exemplos de modelos físicos as aeronaves e casas utilizadas por engenheiros, de modelos análogos, os mapas rodoviários, um marcador de tanque de gasolina. Já os modelos matemáticos representam as grandezas por variáveis de decisão, e as relações entre essas variáveis, por expressões matemáticas. Por tais características esses modelos necessitam de informações quantificáveis (LACHTERMARCHER, 2009).

Destaca-se que o modelo matemático não pode incorporar todas as características, tanto macroscópicas como microscópicas. Deve-se geralmente buscar o custo de se ter o modelo, isto é, o tempo e o esforço requeridos para obtê-lo, e verificar o nível de detalhes, assim como os benefícios esperados de sua aplicação (GARCIA, 2009).

Para Goldbarg; Luna (2005), a definição do problema em modelos matemáticos é considerada uma das fases mais importantes do processo de modelagem, o qual pode ser observado na figura abaixo:

Figura 1. Processo de modelagem

Fonte: Adaptado de GOLDBARG; LUNA (2005).

Como se pode verificar, o processo de modelagem envolve a definição de um problema, para em seguida formular e construir o modelo, analisar os cenários por meio da simulação do modelo, interpretar os resultados, verificar se o modelo é válido, caso não seja, deverá ser reformulado para a aplicação.

Alguns exemplos de problemas podem ser verificados quando ocorre a escassez de certo produto ou matéria-prima, dificuldade para o alcance de uma maior produtividade, fazendo com que se busquem formas mais eficientes e eficazes de se trabalhar com esses recursos escassos. Para a resolução de problemas como esses, e outros encontrados em diversas áreas de conhecimento, pode-se utilizar da modelagem matemática como um problema de otimização, também denominado de programação matemática na literatura.

Logo, os problemas podem ser resolvidos com a proposição de modelos de otimização que são aplicados em diversas situações, podendo citar como exemplos: determinação de mix de produtos, escalonamento de produção, roteamento de logística, planejamento financeiro, carteiras de investimento, análise de projetos, alocação de recursos de mídia, designação de equipe (LACHTERMARCHER, 2009).

Nesse contexto, pode-se compreender que para esses tipos de problemas delimitados por recursos escassos, que afetam de forma negativa o desempenho de um sistema, torna-se necessário a implementação de métodos de otimização para encontrar a melhor solução por meio da definição da região de viabilidade e critério de otimalidade.

Diante das considerações sobre a técnica de otimização, torna-se fundamental uma melhor compreensão de como são importantes para o auxílio em situações que exigem a tomada de decisão, por meio do desenvolvimento de modelos matemáticos que exigem a definição de um problema composto por variáveis de decisão, restrições, função objetiva e determinação da solução ideal. Logo, serão apresentadas no próximo tópico, as características fundamentais dos modelos de otimização

2.7.1. Modelos de Otimização

Os modelos de otimização são definidos em um contexto cujo objetivo é a busca do que é o melhor possível, em relação à solução que se pretende alcançar. Desse modo, pode-se considerar que o processo de construção de um modelo de otimização deve envolver todo o mapeamento do problema, realizando a coleta de dados, para assim definir o problema, por meio da identificação das variáveis, da função objetivo e da definição das restrições, e implementação da técnica de resolução de problemas que possibilite que os resultados encontrados tenham solução ótima.

Segundo Pinheiro (2012), a otimização busca investigar esses problemas na busca de uma solução viável inserida numa região de viabilidade e que, se possível seja, a mais eficiente, pela determinação da solução e valor ótimo do modelo. Uma solução viável é obtida por meio de uma instanciação de valores de variáveis de decisão que satisfazem todas as restrições. As variáveis de decisão, atributos e restrições, reconhecidas pelos modelos de atividade e seus dados relacionados são mapeados a partir do modelo utilizado como base (TAHA, 2008).

Para uma melhor compreensão do processo de otimização são apresentados a seguir, conforme Silva (2001), os conceitos e definições que compõem o modelo de otimização empregados na literatura, quais sejam:

- **Variáveis:** são aquelas que se alteram durante o processo de otimização. Elas podem ser contínuas (reais), inteiras ou discretas (valores compreendidos dentro de um certo conjunto fixo);
- **Restrições:** são funções de igualdade ou desigualdade que descrevem situações indesejáveis do problema, podendo ser divididas em laterais – efetuadas diretamente sobre as variáveis de projeto limitando seus valores, e de comportamento- condições desejáveis de limites, deslocamentos;
- **Espaço de busca ou região viável:** é o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. É caracterizado pelas funções de restrição.
- **Função objetivo:** é a função que se quer otimizar. Pode ser de uma ou mais variáveis, classificadas como otimização unidimensional ou multidimensional, respectivamente;
- **Ponto ótimo:** é o ponto caracterizado pelo vetor $x^x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, formado pelas variáveis de projeto que minimizam a função objetivo e satisfazem as restrições do problema;
- **Valor ótimo:** é o valor da função objetivo $f(x)^*$ no ponto ótimo;
- **Solução ótima:** é o par (de solução) formado pelo ponto ótimo e valor ótimo $[x^x f x^*]$, podendo ainda ser: **Local:** quando o valor ótimo é localizado (vizinhança); **Global:** quando o valor é ótimo é global na região viável; **Restrita:** quando atende todas as restrições; e, **Não – restrita:** quando não atende a alguma das restrições.

Como se sabe, as técnicas de otimização buscam minimizar ou maximizar uma função através da escolha dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto possível visando encontrar uma solução ótima para um dado problema. Desse modo, pode-se compreender que para um problema observado em modelo de otimização, geralmente, pretende-se modelar uma função objetivo de minimização ou de maximização, a qual é dependente das variáveis de decisão e de restrições, tornando-se imprescindível que se determine o algoritmo mais adequado para a solução, e por sua vez do método adequado para a otimização.

No próximo tópico serão apresentados os métodos de otimização, bem como as suas principais definições e proposições na tentativa de compreender como são estabelecidas as condições para se encontrar um ponto ótimo numa dada região de viabilidade.

2.7.2. Métodos de Otimização

Os modelos de otimização têm experimentado um amplo crescimento e variedade de técnicas de resolução de problemas. Essas técnicas surgiram a partir dos métodos matemáticos tradicionais, e são bastante utilizadas devido ao progresso da tecnologia digital, e pela vasta pesquisa na área de engenharia.

A partir dos métodos matemáticos tradicionais (programação linear e não linear, programação dinâmica, multiplicadores lagrangianos ou elementos finitos) foram desenvolvidas novas técnicas para resolver problemas de limitações, como: os métodos estatísticos - regressão estatística, teoria dos conjuntos fuzzy, método de Taguchi ou metodologia de projeto de superfície de resposta e algoritmos não-tradicionais; algoritmos - de bio-inspiração, redes neurais artificiais, tabu search, naturalmente inspirado em algoritmos, ou algoritmos evolutivos como algoritmo genético que são bastante utilizados nos trabalhos acadêmicos (ALVAREZ, BARCENA, GONZALEZ, 2016).

Portanto, as técnicas de otimização e os seus algoritmos para a resolução de problemas destinam-se a estruturar e solucionar os modelos, objetivando-se determinar as melhores condições de funcionamento para os sistemas representados. Cabe salientar que o processo de modelagem em si pouco varia, contudo, as técnicas de solução acabaram sendo agrupadas em várias subáreas, definidas por Goldbarg; Luna (2005), como:

- Programação linear: nesses modelos as variáveis são contínuas e apresentam comportamento linear, tanto em relação às restrições como à função objetivo;
- Programação não linear: ocorre quando o modelo constitui um problema com qualquer tipo de não linearidade, seja na função objetivo ou em qualquer de suas restrições;
- Programação inteira: no modelo qualquer variável não pode assumir valores contínuos, ficando condicionada a assumir valores discretos. O requisito de que variáveis tenham que ser inteiras implica maior complexidade computacional.

A programação não linear é uma técnica, geralmente, implementada para encontrar a solução ótima de problemas de grande porte, fazendo-se necessária na resolução de problemas de modelos que apresentam não linearidade em sua função objetivo ou em suas restrições.

Nesse sentido, busca-se um entendimento maior sobre esta técnica e os métodos de resolução para os tipos de problemas que envolvam a não linearidade.

2.7.3. Programação Não Linear (PNL)

O modelo de programação não linear destaca-se nessa pesquisa, por consistir na otimização de uma função objetivo que pode estar sujeita ou não a restrições, onde tanto a função quanto as restrições podem ou não serem lineares. Esse tipo de otimização apresenta como característica fundamental a capacidade de não possuir um único algoritmo para a resolução dos seus problemas.

Desse modo, a programação não-linear destaca-se por apresentar uma função objetivo ou pelo menos uma equação ou inequação pertinente ao conjunto das restrições com não-linearidade, sendo as variáveis de decisão contínuas em seu domínio de definição (PINHEIRO, 2012). Esse tipo de programação está classificado como probabilístico, por ser um procedimento de otimização aplicado a problemas com decisões sequenciais, ainda que o problema possa ser decomposto em vários estágios, nas quais as decisões são tomadas.

Cabe salientar que os modelos matemáticos podem ser classificados de acordo com o nível de incerteza existente entre as relações das variáveis, como determinísticos ou probabilísticos. Modelos em que todas as informações relevantes são assumidas como conhecidas (sem incerteza) são denominados determinísticos. Já os modelos em que uma ou mais variáveis de decisão não são conhecidas com certeza são chamados probabilísticos, e essa incerteza deve ser incorporada a eles (LACHTERMARCHER, 2009).

A programação não linear nasceu a partir do trabalho pioneiro de Kuhn e Tucker (1951), sendo as décadas de 50 e 60 marcadas por um grande desenvolvimento nessa área. A partir da década de 70 houve uma multiplicação do número de pesquisas e aplicação desta técnica, devido ao crescimento da capacidade de processamento dos computadores de grande porte, e posteriormente, pelo desenvolvimento acelerado dos microcomputadores (CIRILO, 1997).

Um modelo geral de programação não linear com restrições de igualdade e de desigualdade é apresentado a seguir, conforme Pinheiro (2012):

$$\begin{cases} \text{Min } f(x) \\ \text{s. a:} \\ g_t(x) = 0 & \text{para } t = 1, \dots, m; \\ h_i(x) \leq 0 & \text{para } i = 1, \dots, r; \\ x \in X \subset \mathbb{R}^n \end{cases} \quad (03)$$

Onde:

- X é um vetor de n coordenadas $(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ denominado vetor de decisão;
- X é um subconjunto não-vazio do $\mathbb{R}^n$;
- $f(x), g_1(x), \dots, g_m, h_1(x), \dots, h_r(x)$ são funções reais definidas em $\mathbb{R}^n$;
- $f(x)$ é a função objetivo;
- $g_t(x) = 0$, para $t=1, \dots, m$, são restrições de igualdade;
- $h_i(x) \leq 0$, para $i=1, \dots, r$, são restrições de desigualdade;

Problemas semelhantes a esse, os quais contêm restrições, geralmente são de difícil resolução. As dificuldades em se encontrar uma solução dependem da dimensão do vetor x , do número de restrições de igualdade e de desigualdade. Deve-se atentar que nem todos os problemas ou funções possuem um máximo ou mínimo global. A condição suficiente para existência destes é que a função $f(x)$ seja contínua e definida num conjunto fechado e limitado.

Nesse sentido pode-se concluir que a programação não linear trata dos problemas onde a função objetivo ou alguma das restrições são funções não-lineares das variáveis de decisão. Os problemas se dividem em restritos ou não restritos, onde para cada caso há uma enormidade de métodos aplicáveis (SILVA, 2001).

Os algoritmos da programação não linear não atingem necessariamente a solução exata, como ocorre com o método simplex da programação linear, mas geram uma sequência de pontos cujo limite converge ao ponto ótimo. Na prática, o processo de otimização é concluído quando um ponto está suficientemente perto do ponto ótimo (FRTZSCHE, 1978).

Os métodos para resolução de problemas mais aplicados em programação não linear são os seguintes: Método do Gradiente, Método do Gradiente Projetado, Método de Fletcher-Reeves, Método de Newton, os Quase-Newton: Método de Gauss-Newton, Método de Levenberg-Marquardt, Método de Davidon-Fletcher-Powell (DFP), Método de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) e família de Broyden; Métodos de Penalidade, Métodos de Barreira, Método de Ponto Interior e Método Primal-Dual.

Segundo Cirilo (1997), a programação não linear é classificada pela junção dos métodos que utilizam técnicas analíticas e técnicas de busca numérica. No que tange às

técnicas analíticas essas procuram determinar soluções ótimas, resolvendo sistemas de equações que utilizam derivadas. Como exemplos, têm-se: método de multiplicadores de Lagrange, Método de Cálculo Diferencial e Programação Geométrica. Já as técnicas de busca numéricas usam informações assimiladas em um processo iterativo, gerando melhores soluções no processo de otimização. Essas técnicas permitem o emprego de métodos numéricos para resolver problemas dos quais não se conhece solução analítica.

Como o método utilizado para a resolução do problema do modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas, nessa pesquisa, é programação geométrica, será explicada a seguir a sua definição e representação para uma melhor contextualização e compreensão de como se insere na perspectiva da solução do referido modelo.

2.7.4. Programação Geométrica

Os problemas de programação geométrica apresentam funções chamadas de posinômios por serem uma generalização dos polinômios, tendo em vista que os expoentes das variáveis são números reais. Esses problemas não são convexos, mas podem ser transformados em problemas convexos ou em problemas cujas funções são diferentes de funções convexas.

A Programação Geométrica é um dos ramos da programação matemática que procura minimizar uma função de custo que pode ser vista como um polinômio generalizado que consiste de uma soma de termos onde cada termo é um produto de uma constante positiva e das variáveis do modelo elevados a potências arbitrárias (NASCIMENTO, 1996).

A Programação Geométrica é uma técnica de otimização freqüentemente utilizada na solução de uma classe de problemas de programação não linear, especialmente comuns às áreas da engenharia de planejamento e da produção industrial (LIMA JR, NASCIMENTO, 2006). Essa técnica tem sua origem em 1961, quando C. Zener e Richard Duffin estudaram o problema de otimizar polinômios generalizados. Com o objetivo de determinar condições de otimalidade e propriedades das soluções ótimas eles utilizaram desigualdades ao invés da abordagem clássica das condições de Otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker. Uma das desigualdades usadas em seus estudos foi a clássica desigualdade entre a média aritmética e a média geométrica, dando origem ao termo Programação Geométrica (NASCIMENTO, 1996).

A base desta técnica de minimização é encontrada nas propriedades da desigualdade clássica entre a média aritmética-geométrica, que fornece o mínimo do problema dual correspondente, caracterizado por ter restrições lineares. O valor ideal para este problema corresponde ao melhor valor primal (ALUEVA; PPEREZ, 1992).

A técnica de programação geométrica resolve problemas não lineares como àqueles que tanto a função objetivo e as restrições são expressões posinomiais com coeficientes positivos, quando algum coeficiente é negativo trata-se de um problema de programação geométrica signomial. O desenvolvimento matemático da Programação Geométrica está baseado na relação de desigualdade entre somatórios e produtórios de números positivos. Sendo também conhecido como Programação Posinomial. Nesse sentido, a programação geométrica ocorre devido ao relacionamento existente entre as médias geométrica e aritmética, as quais são fundamentais na elaboração da teoria de dualidade em problema de otimização, cujas aplicações são vastas em problemas de engenharia (NASCIMENTO, 1996).

Cabe destacar que os algoritmos de programação geométrica têm sido constantemente melhorados, sendo considerados como ferramentas poderosas para a resolução de problemas algébricos de programação não-linear.

De acordo com Lima Jr; Nascimento (2006), teoricamente, o método da Programação Geométrica tem por fundamento uma desigualdade que relaciona as médias aritmética e geométrica, de modo que, para quaisquer números positivos $x_1, x_2, \dots, x_n$ e para qualquer conjunto de pesos positivos $w_1, w_2, \dots, w_n$, tais que $w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$ (Condição de Normalidade), tem-se

$$w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_n \cdot x_n \geq x_1^{w_1} \cdot x_2^{w_2} \cdot \dots \cdot x_n^{w_n} \quad (04)$$

Um *posinômio* é uma função composta por termos da forma $c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}}$, onde as constantes c_i são positivas e os expoentes a_{ij} são números reais. Se for admitida a possibilidade dos coeficientes c_i serem negativos, então a função passa a ser denominada de *signômio* (BEIGHTLER, 1976).

Genericamente, tem-se que

$$\text{Minimize } f(t)$$

$$\text{sujeito a}$$

$$g_k(t) \leq 1, \quad k = 1, \dots, p, \quad (05)$$

$$t > 0, \quad (06)$$

representa um **PPG**, que será classificado como *posinomial*, se as funções f e g_k , $k = 1, \dots, p$, forem posinômios, e como *signomial*, se alguma dessas funções for um signômio.

2.7.4.1. O problema primal de programação geométrica posinomial

O problema primal de programação geométrica posinomial é um problema da forma:

$$\textbf{Minimize } g_0(t)$$

Sujeito à:

$$g_k(t) \leq 1 \quad k = 1, \dots, p \quad (07)$$

$$t > 0 \quad (08)$$

Onde,

$$g_k(t) = \sum_{i \in J[k]} c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}} \quad (09)$$

$J[k] = \{m_k, m_k + 1, m_k + 2, \dots, n_k\}$ $k = 1, \dots, p$ $m_0 = 1, m_1 = n_0 + 1, \dots, n_p = n$, as constantes c_{ij} são positivas e a_{ij} são números reais.

Problemas de programação geométrica em geral não são problemas convexos, a função $g(t) = t^{1/2}$ não é uma função convexa, no entanto como $t > 0$ a substituição de variáveis $t = e^y$ transforma um problema de programação geométrica em um problema convexo.

2.7.4.2. O problema dual de programação geométrica posinomial

Associado ao problema primal de programação geométrica temos o seu dual o qual é dado por:

$$\textbf{Maximize } v(\delta, \lambda) = \prod_{k=1}^p \left\{ \lambda_k^{\lambda_k} \prod_{i \in J[k]} \left(\frac{c_i}{\delta_i} \right)^{\delta_i} \right\} \quad (10)$$

Sujeito à: $\lambda_0 = 1$

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} \delta_i = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$\delta_i \geq 0$$

Um fato importante é que a função dual v não é uma função côncava, no entanto a função:

$$f(\delta) = \ln(v(\delta)) = \sum_{i=1}^n \{\delta_i \ln(c_i) - \delta_i \ln \delta_i\} + \sum_{k=1}^p \left(\sum_{i \in J[k]} \delta_i \right) \ln \left(\sum_{i \in J[k]} \delta_i \right), \quad (12)$$

satisfaz esta propriedade, sendo a mesma duas vezes diferenciável com matriz Hessiana dada por:

$$\nabla^2 f(\delta) = \begin{bmatrix} H_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & H_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & H_p \end{bmatrix} \quad (13)$$

Onde,

$$H_0 = \begin{bmatrix} -\delta_1^{-1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\delta_1^{-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -\delta_2^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\delta_{n_0}^{-1} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad H_k = \begin{bmatrix} (\lambda_k^{-1} - \delta_{m_k}^{-1}) & \lambda_k^{-1} & \dots & \lambda_k^{-1} \\ \lambda_k^{-1} & (\lambda_k^{-1} - \delta_{m_k+1}^{-1}) & \dots & \lambda_k^{-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_k^{-1} & \lambda_k^{-1} & \dots & (\lambda_k^{-1} - \delta_{n_k}^{-1}) \end{bmatrix}$$

$k = 1, \dots, p$

O relacionamento entre as variáveis primais e duais de um problema de PG é dada pela seguinte relação:

$$\delta_i g_k(t) = \lambda_k c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}} \quad i \in J[k] \quad (14)$$

Definição 1 Definimos o grau de dificuldade (d) de um problema de programação geométrica como:

$$d = n - (m + 1) \quad (15)$$

2.7.4.3. O problema primal de programação geométrica signomial

O problema primal de programação geométrica signomial ou generalizada é uma generalização do problema posinomial e pode ser escrito na seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \textbf{Minimize } g_0(t) \\ & \textbf{Sujeito à: } g_k(t) \leq 1 \quad k = 1, \dots, p \\ & t > 0 \end{aligned} \tag{16}$$

Onde,

$$g_k(t) = \sum_{i \in J[k]} \sigma_i c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}} \tag{17}$$

$J[k] = \{m_k, m_k + 1, m_k + 2, \dots, n_k\} k = 1, \dots, p$ $m_0 = 1, m_1 = n_0 + 1, \dots, n_p = n$, as constantes c_{ij} são positivas e a_{ij} são números reais e $\sigma_i = \pm 1$

Devido ao fato de existir termos negativos o problema acima não pode ser convertido para um problema convexo usando-se transformações de variáveis, desta forma os problemas signomiais são problemas não convexos e qualquer ponto estacionário ou que satisfaça as condições de Karush-Kuhn-Tucker pode ser apenas um mínimo global ou apenas um ponto de sela, tal fato levou inicialmente os pesquisadores a tentarem resolver este tipo de problema usando programação geométrica seqüencial que consiste em resolver problemas signomiais através de uma seqüência de problemas de programação geométrica posinomial esta metodologia denomina-se condensação e será exposta a seguir (NASCIMENTO, 1996)

2.7.4.4. Condensação em programação geométrica signomial

Condensação é uma técnica que consiste em aproximar termos com vários posinomios isto é, termos da forma: $\sum_{i \in J[k]} c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}}$ por um único termo posinomial da forma $c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}}$ para tanto, faz-se uso da seguinte desigualdade:

$$\sum_{i \in J[k]} c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}} \geq \prod_{i \in J[K]} \left(\frac{c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}}}{\omega_i} \right)^{\omega_i} \quad \sum_{i \in J[K]} \omega_i = 1 \quad (18)$$

A qual é uma generalização da desigualdade existente entre a média aritmética e a média geométrica, valendo a igualdade se

$$\omega_i = \frac{c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}}}{\sum_{i \in J[k]} c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}}} \quad (19)$$

Desigualdades desse tipo são chamadas de desigualdades geométricas estas desigualdades são a base de toda a teoria de programação geométrica a partir delas Duffin construiu a teoria de dualidade para programação geométrica.

Podemos escrever uma restrição signomial da seguinte forma:

$$g_k(t) = P_k(t) - Q_k(t) \quad (20)$$

Onde P_k e Q_k são termos posinomiais, usando a desigualdade dada em (10) podemos reescrever a restrição: $g_k(t) \leq 1$ como:

$$\frac{P_k(t)}{1 + Q_k(t)} \leq \frac{P_k(t)}{s_i} \quad \text{onde } s_i = \prod_{i \in J[K]} \left(\frac{u_i(t)}{\omega_i} \right)^{\omega_i} \quad (21)$$

e $\omega_i = \frac{u_i(t')}{1 + Q_k(t')}$ t' é chamado ponto de referência, sendo s_i um único termo posinomial, temos

que a restrição $g_k(t) \leq 1$ com g_k dada na eq. (16) é agora uma restrição posinomial.

Diante da exposição sobre os problemas primais e duais de programação geométrica que podem ser posinomiais ou signomiais, pode-se compreender que os problemas posinomiais são caracterizados por funções de termos positivos enquanto que os signomiais possuem pelo menos um termo negativo. Soluções para problemas posinomiais podem ser encontradas através de algoritmos tais como branch and bound e método de pontos interiores.

No caso de problemas signomiais, existem particularidades, entre elas a não convexidade da função objetivo que torna mais difícil a sua resolução (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2000).

Logo, os problemas de programação geométrica generalizada, também chamada de programação geométrica signomial, são caracterizados por funções objetivos e restrições descritas como a diferença de dois posinomios. Esses problemas contêm um ou mais monômios com coeficientes negativos. Para esta classe de problemas em muitos casos é possível determinar um ótimo local e para encontrar a solução global é necessário utilizar técnicas de otimização global (NASCIMENTO, 1996).

Diante da contextualização sobre a temática do método de programação geométrica, pode-se aferir que o modelo proposto por este estudo apresenta características de não linearidade e de não convexidade em suas variáveis, como será percebido no capítulo 4, que trata do modelo implementado, e, por sua vez, das formações das restrições do problema definido.

Nessa perspectiva, pode-se verificar que a revisão da literatura abordada nesse trabalho contemplou as temáticas essenciais para a construção do modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas, quais sejam, o conceito de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, a sustentabilidade agrícola, os agroecossistemas, a apresentação dos principais indicadores referentes à sustentabilidade em agroecossistemas, a contemplação de modelos matemáticos implementados na literatura para se otimizar a sustentabilidade em agroecossistemas, a conceitualização de modelagem matemática, modelos de otimização e seus métodos de resolução de problema, evidenciando a programação não linear e por sua vez a técnica de programação geométrica.

Diante da contextualização da revisão da literatura, serão expostos no próximo capítulo, os procedimentos metodológicos implementados para a consecução desses fundamentos teóricos, os quais contribuíram para uma definição mais clara dos modelos de otimização que envolvem a sustentabilidade em agroecossistemas, e que vêm sendo apresentados na literatura, assim como para o alcance do objetivo proposto nesse estudo.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA A REVISÃO DA LITERATURA

Visando obter uma melhor compreensão dos temas mais relevantes na literatura existentes, foi realizada uma revisão sistemática da literatura - RSL. Esse procedimento permitiu por meio de suas etapas de identificação, análise e seleção das informações que melhores se adequam ao alcance do objetivo proposto, e, principalmente, para a fundamentação desta dissertação.

Logo, pode-se aferir que a RSL difere da revisão narrativa tradicional por aplicar um processo que é replicável, científico e transparente, o que objetiva minimizar o viés por meio de buscas exaustivas na literatura existente, mostrando o passo a passo das decisões dos pesquisadores e de suas conclusões (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003).

A revisão sistemática consiste no levantamento da literatura por meio de métodos explícitos e sistematizados de busca, com o intuito de identificar, selecionar, apreciar criticamente as pesquisas relevantes e sintetizar a informação selecionada. Logo, sua importância está em permitir a obtenção dos melhores estudos sobre o tema em questão (SAMPAIO; MACINI, 2007).

Nesse sentido, a revisão sistemática foi implementada estudando-se na íntegra os artigos para a composição do *portfolio* e utilizando-se de base de dados. Com a evolução dos sistemas de informações, evidenciou-se o uso de base de dados, que são sistemas de indexação de periódicos, livros, teses, relatórios, anais de eventos dentre outros, a fim de facilitar as buscas de referências bibliográficas e assim, servirem de plataforma teórica para pesquisas futuras (LACERDA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2012).

Segundo Tasca *et al.* (2010, p.7), “as bases de dados são uma ferramenta valiosa para o pesquisador, na medida em que coletam, organizam e facilitam o acesso a informações dispersas na maioria das publicações de uma determinada área”. Nesse contexto, as identificações e seleções realizadas por meio das bases de dados são fundamentais para verificar com maior clareza como se encontra o estado atual da literatura, além de colaborar com a aquisição de mais conhecimento acerca da pesquisa.

Com o intuito de compor um portfólio de artigos para a elaboração da revisão teórica sobre o tema de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas, realizou-se, inicialmente, a escolha das bases de dados, quais sejam, Web of Science e Science Direct, sendo estas consideradas como de referência a nível internacional e que possibilitaram a delimitação do

campo amostral, resultando em um conjunto de artigos disponíveis a serem considerados no processo de seleção de artigos (TASCA *et al.*, 2010).

Destarte, a pesquisadora buscou construir uma análise bibliométrica do portfólio de artigos selecionados para compor o cerne da revisão teórica. Tais procedimentos para a revisão teórica podem ser divididos em três etapas, quais sejam: investigação preliminar; seleção dos artigos que comporão o portfólio para a pesquisa e análise bibliométrica do portfólio de artigos para o referencial teórico em questão (LACERDA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2012).

O horizonte de tempo para a realização da pesquisa nas referidas bases de dados foi de 10 anos (2007 a 2017). Em seguida, foram escolhidas as combinações de palavras-chave, como se vê na tabela 1, abaixo:

Quadro 4. Quantidade de publicações identificadas na fase preliminar

BASE DE DADOS	PALAVRAS-CHAVE	TOTAL
Web of Science	sustentabilidade x agroecossistemas	200
	otimização x agroecossistemas	15
	otimização x agroecossistema x sustentabilidade	10
	otimização x sustentabilidade	600
Science Direct	sustentabilidade x agroecossistemas	71
	otimização x agroecossistemas	50
	otimização x agroecossistemasx sustentabilidade	13
	otimização x sustentabilidade	301

Fonte: Elaboração própria (2018).

Como se pode verificar, foram encontrados 825 artigos na Web of Science e 435 na base de dados, Science Direct. Dessa forma, foram levantados 1260 artigos, os quais passaram por um filtro de não repetição de artigos, sendo, então, retirados 48 artigos duplicados e restando 1212 artigos. Vale ressaltar que foram selecionados somente artigos de periódicos, sendo excluídos os livros, patentes e conferências, restando 1062 artigos.

O terceiro filtro foi a análise do alinhamento do título ao tema de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas. Os artigos que apresentaram falta de alinhamento do título ao tema foram excluídos, restando 305. Após filtrados os artigos de acordo com o alinhamento do título à temática, a pesquisadora fez uma averiguação das maiores

quantidades de citações dos 305 artigos selecionados. Para tanto, verificou-se o número de citações de cada artigo, utilizando o Google Acadêmico. Em seguida, foram ordenados de modo decrescente e, com essas informações, estabeleceu-se um ponto de corte para os artigos mais citados.

Adotou-se, assim, um ponto de corte de acordo com o postulado de Pareto ao se afirmar que uma minoria da população representa a maior parte do efeito. Logo, compreende-se que a seleção da minoria dos artigos mais citados é conveniente, pois estes representam a maior parte do reconhecimento científico do total de artigos.

Tal ponto de corte retornou um total de 120 artigos, que compuseram o grupo dos “artigos mais citados”. Vale ressaltar, que foram adicionados ao portfólio artigos que não receberam citações por serem recentes, de 2015 a 2017. Porém, foram considerados relevantes para a pesquisa, permanecendo no *portfólio*.

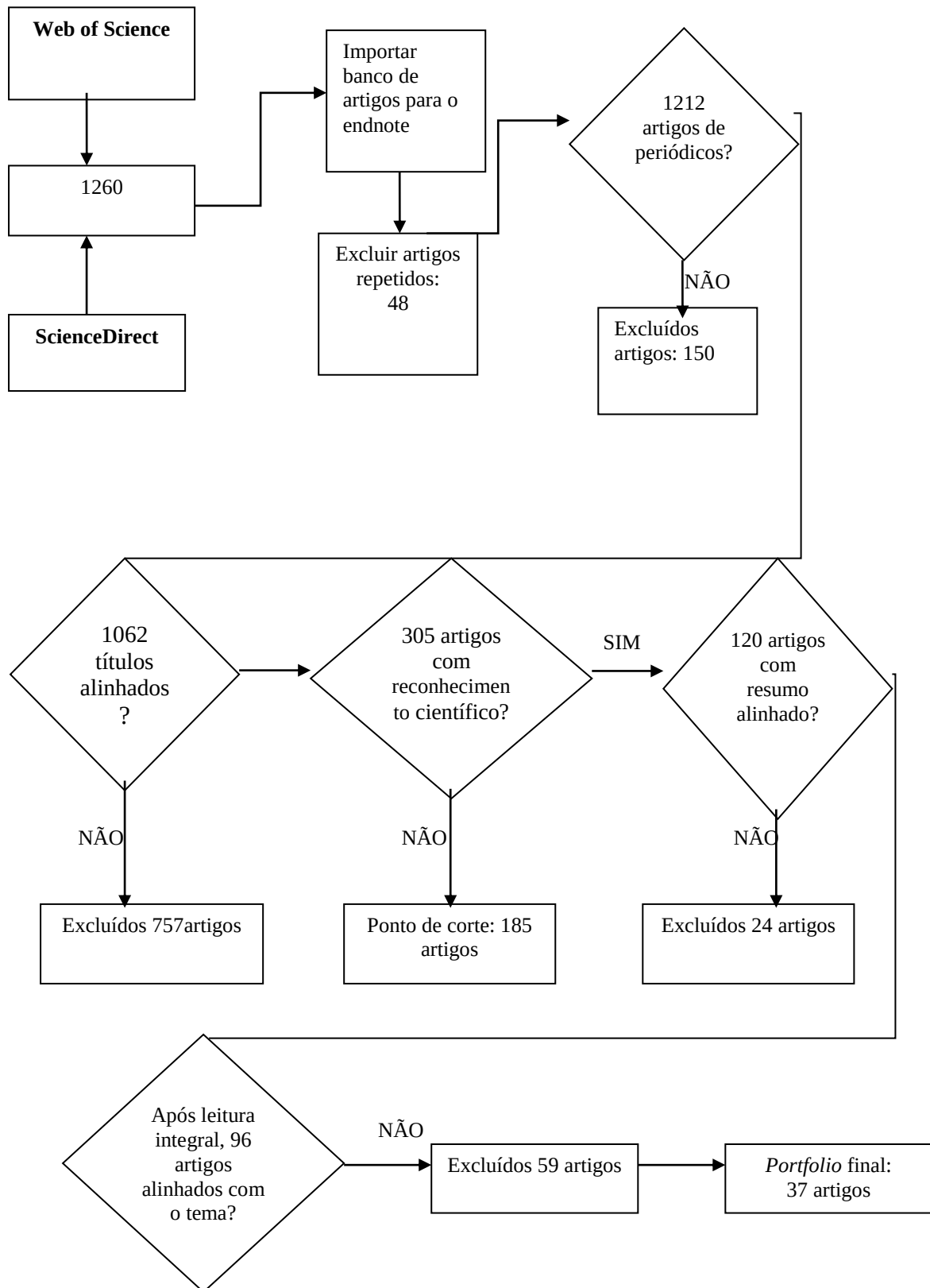
Logo, o *portfólio* apresentou pesquisa a partir do período estipulado, que foi de 2007 a 2017, sendo a maior quantidade de artigos citados encontrada entre 2007 e 2012. Obtendo-se uma quantidade média entre 2012 e 2015, e de mínima a zero, entre 2015 e 2017.

Posteriormente, a pesquisadora realizou a leitura dos resumos dos 120 artigos selecionados para a verificação do alinhamento com a temática da pesquisa, resultando nessa etapa, em 96 artigos para serem lidos integralmente.

Na sequência, realizou-se a leitura integral dos 96 artigos selecionados para a identificação de quais se encaixariam ou não na revisão da literatura de sustentabilidade, agroecossistemas, indicadores de sustentabilidade e modelagem matemática, restando, dessa forma, 37 artigos para a composição do portfólio da pesquisa.

Nesse contexto, todas as etapas adotadas para demonstrar quais os procedimentos foram utilizados para a escolha final dos artigos que auxiliaram no desenvolvimento do capítulo 2, podem ser visualizadas na figura 1, na próxima página.

Figura 2. Etapas adotadas para a seleção do portfólio de artigos



Fonte: adaptado de Lacerda, Ensslin; Ensslin, 2012.

A seguir, no quadro 5, visualiza-se o *portfolio* utilizado para a realização da revisão teórica:

Quadro 5. Artigos utilizados na revisão teórica.

	TÍTULO DO ARTIGO	AUTORES	ANO	CITAÇÃO	PERIÓDICOS
1	Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence	Jules Pretty	2008	798	The Royal Society
2	Soil biodiversity for agricultural sustainability	Brussaard, Ruiter, Brown	2007	498	Agriculture, Ecosystems and Environment
3	SAFE — A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems	Van Cauwenbergh <i>et al.</i>	2007	265	Agriculture, Ecosystems and Environment
4	An indicator framework for assessing agroecosystem resilience.	Cabell, J; Oelofse, M.	2012	134	Ecology and Society
5	Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: a review.	De Meyer, A. <i>et al.</i>	2014	81	Renewable and Sustainable Energy Reviews
6	Multi-objective optimization and design of farming systems	Groot, Oomen, Rossing	2012	75	Agricultural Systems journal
7	Mainstreaming ecosystem services through reformed European agricultural policies	Plieninger <i>et al.</i>	2012	74	Ecosystem services and agricultural policies
8	Balancing the economic, social and environmental dimensions of agro-ecosystems: An integrated modeling approach.	Wei, Y. <i>et al.</i>	2009	61	Agriculture, ecosystems & environment
9	The land cost of agrarian sustainability. An assessment	Guzmán, Molina, Alonso	2011	49	Land Use Policy
10	Sustainable design and operation of cellulosic bioelectricity supply chain networks with life cycle economic environmental, and social optimization.	Yue, D. <i>et al.</i>	2014	42	Ind. Eng. Chem. Res
11	Sustainability indicators, alternative strategies and trade-offs in peasant agroecosystems: analysing 15 case studies from Latin America	Astiera <i>et al.</i>	2011	41	International Journal of Agricultural Sustainability
12	An Integrated Approach for Sustainable Supply Chain Planning	Boukherroub <i>et al.</i>	2014	40	Computers & Operations Research
13	Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life	Henneron <i>et al.</i>	2014	35	Agron. Sustain. Dev.
14	Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods	Biggs <i>et al.</i>	2015	28	Environmental Science & Policy
15	Case Study of an Integrated Framework for Quantifying Agroecosystem Health	Vadrevu <i>et al.</i>	2008	24	Ecosystems
16	Modelling Interaction Networks for Enhanced Ecosystem Services in Agroecosystems	Tixier <i>et al.</i>	2013	19	Adv. Ecol. Res

17	Sustainability-informed maintenance optimization of highway bridges considering multi-attribute utility and risk attitude.	Sabatino, S.; Frangopol, D.; Dong, Y.	2015	16	Engineering Structures
18	A multivariate analysis for evaluating the environmental and economical aspects of agroecosystem sustainability in central Italy	Di Felice <i>et al.</i>	2012	12	Journal of Environmental Management
19	Food web-based simulation for agroecology	Tixier <i>et al.</i>	2013	10	Agronomy for sustainable development
20	Optimizing the environmental performance of integrated waste management scenarios by means of linear programming: a case study.	Tascione, V.; Mosca, R.; Raggi, A.	2016	6	Journal of Cleaner Production
21	Some remarks on computational approaches towards sustainable complex agri-food systems	Perrot <i>et al.</i>	2015	6	Trends in Food Science & Technology
22	Sustainable agricultural development in a rural area in the Netherlands? Assessing impacts of climate and socio-economic change at farm and landscape level	Reidsma <i>et al.</i>	2015	6	Agricultural Systems
23	Assessing regional sustainable development through an integration of nonlinear principal component analysis and Gram Schmidt orthogonalization	Tan; Lu.	2015	5	Ecological Indicators
24	Biomass supply chain network design: an optimization-oriented review and analysis.	Ghaderi, H.; Pishvae, S.; Moini, A.	2016	4	Industrial Crops and Products
25	Agricultural Sustainability in Developing Countries: An Assessment of the Relationships Between Drivers and Indicators in Hoa Binh Province, Vietnam	Pham; Smith.	2013	4	Agroecology and Sustainable Food Systems
26	Sustainability Optimization in Manufacturing Enterprises	Ibrahim H. Garbie	2015	4	Journal of Cleaner Production
27	A Weighted Goal Programming model for planning sustainable development applied to Gulf Cooperation Council Countries	Jayaraman <i>et al.</i>	2017	2	Applied Energy
28	Relevancy and role of whole-farm models in supporting smallholder farmers in planning their agricultural season	Sempore <i>et al.</i>	2015	2	Environmental Modelling & Software
29	A Review of Sustainable Machining Engineering: Optimization Process Through Triple Bottom Line	Alvarez, Barcena, Gonzalez.	2016	1	Journal of Manufacturing Science and Engineering
30	Sustainability enhancement under uncertainty: a Monte Carlo-based simulation and system optimization method	Liu; Yinlun Huang.	2015	1	Clean Techn Environ Policy

31	Aggregate index of social–environmental sustainability to evaluate the social–environmental quality in a watershed in the Southern Amazon	Roboredo; Bergamasco; Bleicha.	2015	1	Ecological Indicators
32	Sustainability screw: role of relative production and abatement time scales	Filar; Krawczyk; Agrawal.	2015	1	Journal of the Operational Research Society
33	Current Epistemological Perceptions of Sustainability and Its Application in the Study and Practice of Cattle Production: A Review	Saguilán <i>et al.</i>	2015	0	Agroecology and Sustainable Food Systems
34	Farm-level environmental performance assessment in Hungary using the Green-point system	MÉSZÁROS <i>et al.</i>	2015	0	Studies in Agricultural Economics
35	Use of linear programming to optimize the social, environmental, and economic impacts of using woody feedstocks for pellet and torrefied pellet production	Radics; Dasmohapatra, Kelley.	2016	0	Biofuel, Bioprod. Bioref.
36	Development of a nitrous oxide routine for the SWAT model to assess greenhouse gas emissions from agroecosystems.	Wagena, M. <i>et al.</i>	2017	0	Environmental Modelling & Software
37	An inexact CVaR two-stage mixed-integer linear programming approach for agricultural water management under uncertainty considering ecological water requirement.	Zhang, C.; Guo, P.	2017	0	Ecological Indicators

Fonte: Elaboração Própria (2018).

Dessa forma, a importância atrelada à estruturação da pesquisa em forma sistemática, contribuiu para a elaboração da revisão teórica sobre o tema de modelagem matemática para otimização da sustentabilidade em agroecossistemas, e, principalmente, possibilitou encontrar os melhores resultados quanto aos modelos matemáticos mais utilizados na perspectiva da sustentabilidade.

Cabe salientar que além do portfólio de artigos, buscou-se identificar, outrossim, quais os autores clássicos que já haviam tratado deste tema, bem como as pesquisas recentes especialmente em periódicos nacionais, livros, dissertações e teses que pudessem ser mais relevantes para a revisão da literatura e para a construção do modelo, constituindo, assim, o alicerce sobre o qual esta pesquisa está estruturada. Logo, a revisão da literatura implementada, permitiu uma melhor compreensão para o processo de construção do modelo matemático, o qual será exposto no próximo capítulo.

4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO E SUSTENTABILIDADE DE AGROECOSSISTEMAS

O modelo de otimização adotado nesta pesquisa é baseado em programação não linear, o qual se destina a determinar a maior produção possível de agroecossistemas mantendo-os dentro de um nível estável ou ótimo de sustentabilidade, segundo um índice estabelecido. Para a construção do modelo, verificou-se que as variáveis de decisões devem se relacionar aos indicadores de sustentabilidade e às características físicas dos componentes, identificados no estudo dos agroecossistemas modernos que atuam com a cultura de banana irrigada, em Ipanguançu – RN, realizado por Reis (2013), em sua tese de doutorado.

A partir dos indicadores de sustentabilidade selecionados nesse estudo, foram definidas as informações necessárias para a entrada de dados no modelo, as quais devem estar vinculadas a esses indicadores, na medida em que envolve a gestão da capacidade do solo com o uso adequado de fertilizantes e de agrotóxicos, o controle do consumo de energia e de água, a gestão dos contratos de trabalho, dos preços de venda no mercado, e por sua vez da minimização dos custos de produção, para a obtenção da manutenção da produtividade, resiliência e equidade das condições econômicas, ambientais e sociais em agroecossistemas.

Para a construção desse modelo de otimização de agroecossistemas foi observado que as relações entre as grandezas envolvidas podem ser estabelecidas através de um tipo especial de função, sendo essas denominadas de funções Cobb-Douglas, isto é, funções da forma: $f(t) = at^b$ $a > 0, t > 0$. Esse tipo de função foi utilizado para criar as funções de relação entre as variáveis de decisão e consequentemente do índice de sustentabilidade. Esses problemas são denominados de Programação Geométrica propostos por Zener (1961) e solidificados por Duffin (1961).

A Programação Geométrica ocorre devido ao relacionamento existente entre as médias geométrica e aritmética, as quais são fundamentais na elaboração da teoria de dualidade em problemas de otimização, com aplicações vastas em problemas otimização encontrados na área de engenharia (NASCIMENTO; LIMA JR; SANTOS, 2014).

Problemas de programação geométrica em geral não são problemas convexos, a função $g(t) = t^{1/2}$ não é uma função convexa, no entanto como $t > 0$ a substituição de variáveis $t = e^y$ transforma um problema de programação geométrica em um problema convexo.

Diante do exposto sobre o método de programação geométrica, para a implementação de um modelo de otimização, que vise a obtenção da maximização da produtividade, mantendo níveis estáveis de sustentabilidade é imprescindível que haja a seleção de

informações necessárias para a formulação do problema. Dessa forma, cabe salientar as etapas que foram implementadas para o processo de construção do modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas, descritas a seguir:

1. Identificação das variáveis;
2. Definição das restrições;
3. Definição da função objetivo;
4. Coleta dos dados;
5. Construção do modelo;
6. Implementação Computacional ou uso de software específico; e
7. Validação dos resultados.

Inicialmente, serão apresentadas, no próximo tópico, as características fundamentais dos agroecossistemas modernos de bananeira irrigada, tomadas como base para a definição do problema, construção do modelo, proposição do índice de sustentabilidade e validação dos resultados encontrados.

4.1. DADOS DO MODELO

O presente modelo tem como fundamento as informações de 4 (quatro) agroecossistemas modernos, estudados por Reis (2013), em sua tese de doutorado sobre Avaliação de Sustentabilidade de Agroecossistemas de Bananeira Irrigada de formas diferentes de produção moderna e tradicional: O Caso de Ipanguaçu–RN, tendo em vista que esse estudo contém os dados dos indicadores de sustentabilidade de agroecossistemas, obtidos por meio da implementação do instrumento IDS (S^3), contribuindo, dessa forma, com informações pertinentes e características marcantes do ambiente para a realização da modelagem matemática, e também, para a implementação de um novo índice de sustentabilidade para os quatro agroecossistemas modernos, com o intuito de encontrar uma solução quanto ao nível de sustentabilidade.

Dessa forma, o referido trabalho de avaliação da sustentabilidade realizado nos agroecossistemas modernos, possibilitou por meio dos seus dados secundários uma melhor compreensão da problemática levantada para, assim, serem definidas quais as relações

existentes entre produtividade, manejo e resiliência, e como quantificar e modelar tais fenômenos atendendo a limiares de sustentabilidades existentes na literatura.

Nesse sentido, será feita uma exposição, de forma sucinta, sobre os 4 (quatro) agroecossistemas de produção moderna de bananeira irrigada, selecionados do estudo de Reis (2013), a seguir:

- Apresentam as características básicas dos ecossistemas modificados pela ação antrópica, por meio de práticas de técnicas agrícolas e do uso de tecnologias desde as tradicionais até as atuais, o que tem provocado alterações tanto nos recursos naturais – vegetação, solo e água – quanto na economia, no social, na política pública e privada, de Ipanguaçu–RN (REIS, 2013);
- São contextualizados numa escala administrativa e de produção de grande empresa multinacional, distribuídos espacialmente no município de Ipanguaçu–RN, da seguinte forma, por comunidade: Baldum: 2, Base Física: 1, Olho d’água: 1. Situando-se, à margem direita do Rio Piranhas Açu – de onde captam água para irrigação –, sobre a planície fluvial, formada por solos aluviais, sobrepostos a uma altitude média de 24 metros (REIS, 2013);
- Caracterizam-se pelo uso de novas tecnologias: mecanização, trator e outros implementos; alto uso de agroquímicos, pulverização direta por meio de atomizador apoiado ao ombro do operador e indireto por via aérea; elevado conhecimento científico e tecnológico; alta empregabilidade por hectare, atendimento de direitos sociais de trabalhadores; utilizam EPIs; analisam periodicamente: fertilidade do solo e qualidade da água armazena, higieniza e transporta adequadamente (REIS, 2013);
- O processo de manejo segue etapas básicas como: a) preparo do solo – aração e gradagem –; b) densidade de plantio – quantificação de planta conforme variedade –; c) covas – formação de piquetes para a marcação das covas –; d) covamento – manual ou mecanizada –; e) mudas – seleção de mudas –; f) plantio – colocação de mudas na cova previamente adubada –; g) irrigação, fertirrigação e nutrição – disponibilização de água e nutrientes –; h) desbrota – controle de filhotes na touceira –; i) corte mangará – eliminação, quando formada a última penca, e desfolhamento das folhas descartadas –; j) quebra-ventos – proteção contra ventanias –; k) colheita – finalização do ciclo –, que

pode variar de 80 a 110 dias após a emissão do coração (BORGES et al., 2004; REIS, 2013).

Diante do exposto sobre as características dos agroecossistemas avaliados por Reis (2013), destaca-se que os resultados encontrados serão apresentados na tabela 1, na página 81. Nesse sentido, ressalta-se que o tratamento dos dados para avaliação da sustentabilidade, pela autora, deu-se por meio da utilização do instrumento IDS (S³), incorporando as seguintes características: sustentabilidade, produtividade, equidade, em relação às dimensões ambiental, econômica e social e político-institucional, estruturadas por meio de 28 indicadores, conforme se pode verificar, no Anexo A, desta dissertação.

Segundo Reis (2013, p. 64),

a justificativa para a retirada ou o acréscimo dos indicadores dimensionais foi construída a partir da caracterização e da distinção dos agroecossistemas, optando-se por um número de indicadores, em cada dimensão, entre sete a nove, e diferentes parâmetros, para demonstrar os agros irrigados de bananeira em Ipanguaçu-RN. Após a operacionalização, no *Excel* 2007–biograma chegou-se ao índice de cada indicador pela média aritmética. Antes, todavia, eles foram submetidos à função relação: se positiva (+), quando o aumento no valor da variável resulta na melhoria do sistema agrícola e se negativa (–), quando aumento no valor da variável resultar na piora do sistema agrícola.

Nesse íterim, pode-se verificar a importância atrelada ao instrumento IDS (S³), para a avaliação da sustentabilidade dos agroecossistemas em cada dimensão, por meio dos indicadores selecionados. Logo, essa possibilidade de selecionar indicadores de acordo com as características marcantes desses agroecossistemas, permitiu que, também, fosse realizada a seleção de qual desses indicadores melhor se encaixariam para a construção do modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas. No próximo tópico, serão expostos os indicadores tomados como base para a definição das variáveis de decisão, e, por sua vez, da proposição do índice de sustentabilidade.

4.1.1. Indicadores de Sustentabilidade

Os indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas selecionados com base no instrumento IDS (S³) e nos dados secundários obtidos da tese de (Reis, 2013), para a construção do modelo matemático são os seguintes:

Quadro 6. Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas

Indicadores da Dimensão Ambiental	Indicadores da Dimensão Econômica	Indicadores da Dimensão Social
Consumo de água – A1	Produtividade – E1	Emprego direto – S1
Consumo de energia – A2	Confiança econômica – E2	
Uso de Fertilizantes – A3		
Uso de agroquímico – A4		
Área de reserva legal – A5		

Fonte: Adaptado de Reis (2013).

Diante da visualização dos indicadores selecionados para melhor interpretação e adaptação do modelo à realidade do ambiente estudado para a validação dos resultados, destaca-se que o quadro 4, exposto na página 43, o qual demonstra a escala do estado da sustentabilidade, assim como a função relação do método IDS (S^3) e a função de Cobb-Douglas, também serão utilizados para a formulação do problema e otimização dos quatro agroecossistemas modernos que cultivam a banana irrigada. Nesse ínterim, torna-se imprescindível apresentar os dados encontrados na literatura sobre a cultura da banana irrigada, como se pode verificar, no quadro 7, abaixo:

Quadro 7. Dados para a cultura de banana irrigada

Recomendações para a produção de banana	Parâmetros
α - proporção de reserva legal	20 % (Brasil, 2018)
fk; Fk - limite inferior e superior para quantidade de fertilizantes k necessários (N - Nitrogênio, P- Fósforo, K - Potássio). P Mehlich, mg/dm ³ K solo, cmol _c / dm ³ Teor do solo 1 (0,0 – 6,0) Teor do solo 1 (0,0 - 0,15) Teor do solo 2 (6,1 – 15) Teor do solo 2 (0,16- 0,30) Teor do solo 3 (15,1-30) Teor do solo 3 (0,31- 0,60)	N - (fk: 360; FK: 600) P - teor do solo 1 (fk: 80, FK: 160); 2 (fk: 60, FK: 120) 3 (fk: 40, FK: 80); K - teor do solo 1 (fk: 750, FK: 1200); 2 (fk: 550, FK: 850) 3 (fk: 300, FK: 450). (Borges, 2004).
Prmink, Prmaxk: produção esperada quando aplicada as quantidades fk; Fk	Prmink: 20k; Prmaxk: 60k (Borges, 2004).
Prfk - Preço dos fertilizantes k (N, K e P)	N (15kg): R\$109,89; K (20kg): R\$134,00; P (20kg) : R\$117,90 (Mercado Livre, 2018).
Aid - quantidade de água considerada sustentável para o cultivo por planta diária	30 L/P/Dia (Borges e Souza, 2004).
Enid - quantidade de energia elétrica considerada sustentável para irrigação diária	3,72kwh/dia (Alfaro e Marin, 1991).
AM = Área do Município corresponde à cultura de banana (ha)	800ha (IBGE, 2018).
Nes - número de empregados sindicalizados ou cadastrados como trabalhadores rurais do município	696 (IBGE, 2018).
α_s – limite inferior da faixa de sustentabilidade	0,6 (Sepúlveda, 2008).
Preço mínimo e máximo de mercado (22kg) de banana	Precmin: R\$11,44; Precmax: R\$16,00 (CEASA, 2018).
Produção de banana em toneladas (Local: 32.000; Regional: 155.014, Nacional: 7 234 262)	Prod min: 32.000; Prod Max: 7 234 262 (IBGE, 2018).
Ce = custo do kilowatt de energia na zona rural do Rio Grande do Norte	R\$ 0, 43421494 (COSERN, 2018).
Tc = Tempo em dias desde o plantio até a colheita	360 dias (Borges e Souza, 2004).
Potência das bombas utilizadas	½ cv
Napagt = Número de aplicações de agrotóxicos recomendada	10 L/ano (Borges e Souza, 2004).

$Da_{id} = \frac{N_{apagt}}{2}$ = Quantidade considerada sustentável de agrotóxico por hectare ao ano.	0,5 L/ha Borges e Souza (2004)
Preço de 1L do agrotóxico (Tebuconazole/Folicur200CE) utilizado nos agroecossistemas para combater a sigatoka amarela	R\$167,00 (Mercado livre 2018).
Valor do contrato de trabalho na zona rural	R\$1700,00.

Fonte: Elaboração Própria (2018).

A partir do exposto sobre os indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas selecionados para a construção do modelo de otimização, e dos dados secundários da cultura de banana irrigada, seguimos para a formulação do problema com a definição das variáveis, dos parâmetros e das restrições.

4.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para a definição das variáveis de decisões e das restrições do modelo, foram considerados os indicadores de sustentabilidade selecionados do estudo de Reis (2013), expostos no quadro 6, na página 73. Tendo em vista a necessidade premente do modelo representar as características reais dos agroecossistemas escolhidos para a formulação e resolução do problema, de forma a atender às três dimensões da sustentabilidade.

Logo, na **dimensão ambiental**, o indicador consumo de água é representado nesse modelo pelas variáveis: consumo de água utilizado (m^3), tempo de utilização da bomba d'água para irrigação (horas), vazão das bombas utilizadas e número de bombeamento. Essas variáveis também interferem no indicador consumo de energia, que apresenta como variável o consumo de energia diário (kwh/dia); o indicador área de reserva legal é representado pela variável da área a ser utilizada para o plantio; Já o indicador do uso de fertilizantes é visualizado na variável quantidade de fertilizantes do tipo k a ser utilizada; E o indicador do uso de agrotóxicos é referenciado pela variável quantidade de agrotóxicos utilizados. Quanto à **dimensão econômica**, o indicador de confiança econômica é representado pela variável preço de venda; e o indicador produtividade visualizado nas variáveis número de mudas ou plantas e produção da cultura cultivada por planta. Em relação à **dimensão social**, o indicador de emprego direto é representado nas variáveis: número de contratos de trabalho e valor do contrato de trabalho unitário. Como pode ser verificado abaixo, na definição das variáveis, parâmetros tecnológicos e restrições do problema:

4.2.1. Definição das variáveis

- ♦ Ar- área a ser utilizada para o plantio
- ♦ Np- número de mudas ou plantas
- ♦ P - produção da cultura cultivada por planta
- ♦ Pr- preço de venda
- ♦ E- consumo de energia diário (kwh/dia)
- ♦ Ag- consumo de água utilizado (m³)
- ♦ Nc - número de contratos de trabalho
- ♦ V- valor do contrato de trabalho unitário (R\$)
- ♦ Ft_k - quantidade de fertilizantes do tipo k a ser utilizada (kg/ha)
- ♦ T - tempo de utilização da bomba d'água para irrigação (horas)
- ♦ Agt- quantidade de agrotóxicos utilizados (litros/ha)
- ♦ Vazão – vazão das bombas utilizadas
- ♦ Nb – número de bombeamento

4.2.2. Parâmetros Tecnológicos

- ♦ AT - Área total disponível
- ♦ α - Proporção de reserva legal
- ♦ fk; Fk - Limite inferior e superior para quantidade de fertilizantes k necessários
- ♦ Prmink; Prmaxk - Produção esperada quando aplicada as quantidades fk; Fk do fertilizante k
- ♦ Prfk - Preço do fertilizante k
- ♦ Aid - Quantidade de água considerada sustentável para cultivo por planta diária
- ♦ Enid - Quantidade de energia elétrica considerada sustentável para irrigação diária
- ♦ AM – Área do município (km²)
- ♦ Nes - Número de empregados sindicalizados ou cadastrados como trabalhadores rurais do município
- ♦ α_{temp} - Fator tempo usado para corrigir a quantidade de água
- ♦ α_s - Limite inferior da faixa de sustentabilidade
- ♦ β - Parâmetro de sustentabilidade - $P = \frac{\log(4)}{\log(\frac{3}{2})}$
- ♦ $\gamma = \log(\text{Prmaxk}/\text{Prmink})/\log(\text{Fk}/\text{fk})$
- ♦ $\theta = \log(4)/(\log(2))$
- ♦ Pot - Potência da bomba utilizada
- ♦ Preço mín - Preço mínimo de mercado
- ♦ Preço max - Preço máximo de mercado
- ♦ Prod min - Menor produção (local, regional, nacional)
- ♦ Prod max - Maior produção (local regional, nacional)
- ♦ Ce - custo do kilowatt de energia na zona rural
- ♦ Tc - Tempo em dias desde o plantio até a colheita
- ♦ Napagt - Número de aplicações de agrotóxicos recomendado
- ♦ Cagt - custo do agrotóxico por litro
- ♦ Das = Napagt/2 - Quantidade considerada sustentável de agrotóxico por hectare ao ano.
- ♦ Nemp - Número de contratos de trabalho considerado sustentável $Nemp = (A_T/AM)$
- Nes

- ♦ Vsal - Valor mínimo de um contrato de trabalho na atividade agrícola.
- ♦ PC - percentual do valor da produção gasto com custos
- ♦ Vmerc - vazão de bomba com potencia de $\frac{1}{2}$ cv

4.2.3. Definição das Restrições

As restrições do problema traduzem as limitações do sistema de produção para os agroecossistemas através das inequações que correspondem às áreas máximas e mínimas que podem ser plantadas da cultura por hectare, ao consumo adequado de água, ao tempo gasto com energia pelo sistema de bombeamento, ao consumo de fertilizantes para a obtenção da produção esperada, ao preço de venda do produto cultivado, ao número de contratos de trabalho, e ao uso de agrotóxicos.

Nesse sentido, as restrições que compõem o modelo serão explicadas na sequência, ressaltando-se a referência às funções de relação estabelecidas por limites maiores ou iguais ao parâmetro 0,6 (Selpúveda, 2008), conforme o quadro 4, na página 43, que para a definição das restrições da sustentabilidade. Logo, quando abaixo de 0,6 a função relação é negativa, e acima de 0,6, a função relação é positiva para as restrições da sustentabilidade dos agroecossistemas.

♦ Área de Reserva Legal

A restrição para a área cultivada e de reserva legal é obtida sendo A_r (área de reserva legal) menor ou igual a 1 menos o parâmetro de reserva legal $\alpha = 20\%$ da A_T (área total de um agroecossistema).

Portanto, a Área de Reserva Legal é dada pela expressão:

$$A_r \leq (1 - \alpha)A_T$$

♦ Consumo da Água

A restrição do volume de água é constituída pela quantidade consumida de água, número de plantas e área utilizada sendo menor ou igual à capacidade máxima de vazão através do tempo do sistema de bombeamento.

$$AgNpA_r \leq Vazão * T$$

♦ **Consumo da Energia**

A restrição do consumo de energia gasto diariamente deve ser maior ou igual à potência da bomba utilizada sobre 1000.

$$E \geq \frac{potT \ Vazao}{1000 \ Vmerc}$$

♦ **Produção Esperada**

A restrição da produção esperada quando utilizados os fertilizantes k, sendo N (Nitrogênio), P (Fósforo) e K (Potássio), sendo que esses devem ser menores ou iguais à produção.

$$Prminkfk^{-\gamma}Ftk^{\gamma} \leq P$$

♦ **Preço de Venda**

A restrição do preço de venda está relacionada ao preço mínimo e o preço máximo de venda no mercado para obtenção da confiança econômica.

$$Preçomin \leq P_r \leq Preçomax$$

♦ **Valor do Contrato de Trabalho**

A restrição do valor de contrato de trabalho é composta pelo valor do contrato de trabalho unitário (R\$) sendo maior ou igual ao valor mínimo de um contrato de trabalho na atividade agrícola.

$$V \geq Vsal$$

♦ **Contrato de Trabalho**

A restrição do contrato de trabalho define que o número de contrato de trabalho deve ser menor ou igual à área a ser utilizada para o plantio.

$$Nc \leq ArNemp$$

♦ Sustentabilidade da Água

A restrição de sustentabilidade do consumo de água considera que uma planta ou muda consome de forma sustentável $Aid\ m^3$ de água diariamente, para tanto foi usado o parâmetro de sustentabilidade $\beta = \frac{\log(4)}{\log(\frac{3}{2})}$. Considerando que esse consumo deve ser abaixo de 30l/p/dia, conforme Borges; Souza, (2004), e maior ou igual ao limite inferior da faixa de sustentabilidade de $\alpha_s = 0,6$.

$$Aid^{-\beta} Ag^{-\beta} \geq \alpha_s$$

♦ Sustentabilidade da Energia

A restrição da sustentabilidade da energia é constituída pela quantidade de energia considerada sustentável para o cultivo por planta diária e o consumo de energia diário, que deve ser abaixo do parâmetro de 3,72kwh/dia, conforme (Alfaro e Marin, 1991) e maior ou igual ao limite de sustentabilidade de $\alpha_s = 0,6$.

$$Enid^{-\beta} E^{\beta} \geq \alpha_s$$

♦ Sustentabilidade do Uso de Agrotóxicos

A restrição da sustentabilidade dos agrotóxicos é formada pela quantidade considerada sustentável de agrotóxico por hectare ao ano e pelo consumo de agrotóxico por litro que deve ser de 0,5L /ha (Borges e Souza, 2004), sendo $\geq \alpha_s = 0,6$, o limite inferior da faixa de sustentabilidade.

$$(Das)^{-\beta} Agt^{\beta} \geq \alpha_s$$

♦ Sustentabilidade da Empregabilidade

A restrição da sustentabilidade da empregabilidade é definida pelo número de contratos de trabalho considerado sustentável e o número de contratos realizado, devendo estar acima ou dentro do limite considerado estável de sustentabilidade, qual seja, 0,6.

$$Nemp^{-\theta} Nc^{\theta} \geq \alpha_s$$

♦ Sustentabilidade dos preços de mercado

A restrição da sustentabilidade dos preços é formada como sendo a média entre o preço mínimo e o máximo de mercado, devendo ser menor ou igual ao limite de sustentabilidade de valor ótimo.

$$as * Pre_{comin}^{\alpha} - \beta * Pr^{\beta} \leq 1$$

♦ Produtividade

A restrição da produtividade é composta pela metade do valor da produção (percentual de custo com produção, preço de venda, produção por planta, número de plantas e área utilizada para plantio) sendo maior ou igual ao percentual do valor da produção gasto com custos (custo de energia, custo com agrotóxico, fertilizantes e número de contrato de trabalho). Esse percentual gasto com custo não deve ser maior que 50%. Dessa forma, buscase maximizar os lucros da produção, reduzindo os custos e mantendo os níveis de sustentabilidade estáveis.

$$C_e T_c E + C_{agt} A_{gt} + Pr_{fk} F_{tk} + N_c V \leq PC Pr P N p Ar$$

4.2.4. Função Objetivo

A função objetivo consiste na estrutura real do desempenho de um sistema como uma função matemática de suas variáveis de decisão. Portanto, quando um modelo identifica uma solução ótima para determinados agroecossistemas, significa que os valores correspondentes obtidos das variáveis de decisão considerados mais adequados conseguiram satisfazer suas respectivas restrições.

Nesse sentido, pode-se compreender que a função objetivo desse modelo está sujeita às equações e inequações de restrições expostas acima. Portanto, tem-se como objetivo maximizar a produção por planta, o preço de venda, o número de plantas e a área utilizada para plantio para garantir a maior produção possível dos agroecossistemas, sendo dada por:

$$\text{Max } Pr P N p Ar$$

A partir da compreensão das variáveis, parâmetros e restrições que compõem o modelo, assim como da função objetivo, torna-se imprescindível definir o problema estabelecido para este modelo de otimização e o índice de sustentabilidade proposto para os agroecossistemas.

4.3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Diante da definição das variáveis, dos parâmetros, restrições e da função objetivo, tem-se que o problema de otimização de agroecossistemas modernos com níveis estáveis de sustentabilidade é um problema da seguinte forma:

$$\text{Max } PrPNpAr$$

Sujeito à:

$$Ar \leq (1 - \alpha)A_T \quad (22)$$

$$Aid^{-\beta} Ag^{-\beta} \geq \alpha_S \quad (23)$$

$$AgNpAr = Vazão * T \quad (24)$$

$$Enid^{-\beta} E^{\beta} \geq \alpha_S \quad (25)$$

$$E = \frac{potT}{1000} \left(\frac{Vazão}{Vmerc} \right) \quad (26)$$

$$Prminkfk^{-\gamma} Ftk^{\gamma} \leq P \quad (27)$$

$$Preçomin \leq P_r \leq Preçomax \quad (28)$$

$$Das^{-\beta} Agt^{\beta} \geq \alpha_S \quad (29)$$

$$Nemp^{-\theta} Nc^{\theta} \geq \alpha_S \quad (30)$$

$$Nc \leq ArNemp \quad (31)$$

$$V \geq Vsal \quad (32)$$

$$V \leq 2Vsal \quad (33)$$

$$0.02 \leq P \leq 0.06 \quad (34)$$

$$T \leq 24 \quad (35)$$

$$Ag \geq 0.03 \quad (36)$$

$$E \leq 3.72 \quad (37)$$

$$CeTc E + CagtAgt + Prfk Ftk + NcV \quad (38)$$

$$\leq PC PrPNpAr \quad (39)$$

$$(40)$$

$$\alpha_S * Precomin^{-\beta} * Pr^{\beta} \leq 1 \quad (41)$$

Dessa forma, compreende-se que a função objetivo visa maximizar o ganho total produzido $PrPNpAr$, estando vinculada às variáveis e restrições relacionadas aos níveis estáveis de sustentabilidade.

Quanto ao Índice de sustentabilidade proposto para a validação do modelo no que tange aos níveis estáveis de sustentabilidade, esse pode ser visualizado, abaixo:

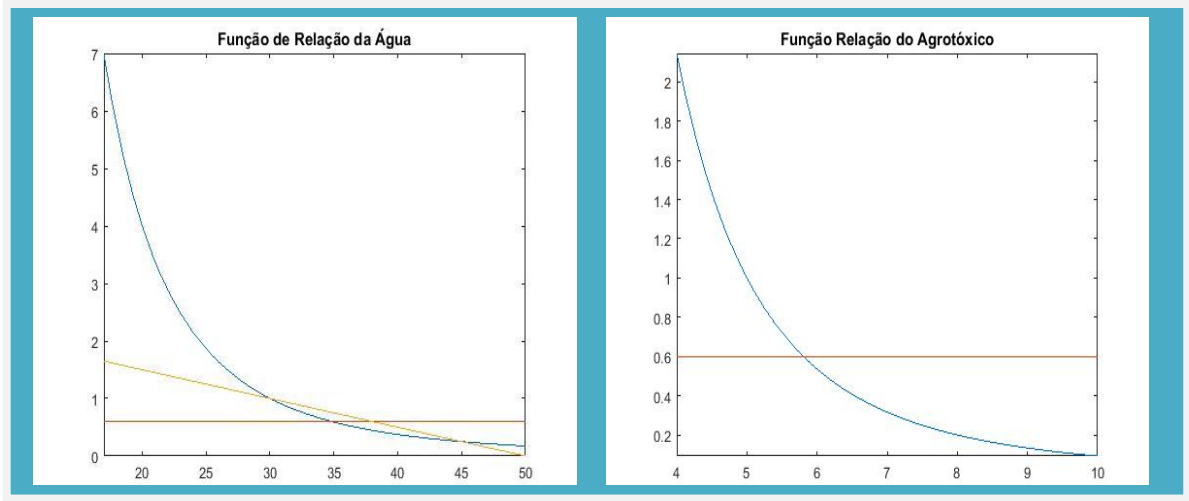
$$IS = \frac{1}{5} (\min(Aid^{-\beta} Ag^{-\beta}, 1) + \min(Enid^{-\beta} E^{\beta}, 1) + \min((Das)^{-\beta} Agt^{\beta}, 1) + \min(Nemp^{-\theta} Nc^{\theta}, 1)) + \min(Precomin^{-\beta} Pr^{\beta}, 1)) \quad (42)$$

Esse índice de sustentabilidade proposto, apresenta valores que devem estar entre 0 e 1, conforme o estado de sustentabilidade do IDS (S^3) de Sepúlveda (2008), visualizados no quadro 2, página 43. Desse modo, quando a função passar de 1 (um) deve permanecer com valor 1 (um), tendo em vista que apresenta nas restrições, o valor mínimo encontrado pelos produtos elevados à potência de cada indicador de sustentabilidade e o valor estabelecido de no máximo 1(um).

Como se pode constatar, esse índice de sustentabilidade (IS) é composto pelas restrições da sustentabilidade, as quais têm um relacionamento de forma exponencial, com função não linear, na medida em que apresenta expoentes negativos para a sustentabilidade da água, energia e agrotóxicos, e expoentes positivos para a sustentabilidade do número de contratos e do preço de venda.

Nesse sentido, serão demonstradas como as funções de relação negativa ocorrem fazendo com que a sustentabilidade se apresente de forma decrescente, como se pode verificar na representação dos gráficos, na figura 3, abaixo:

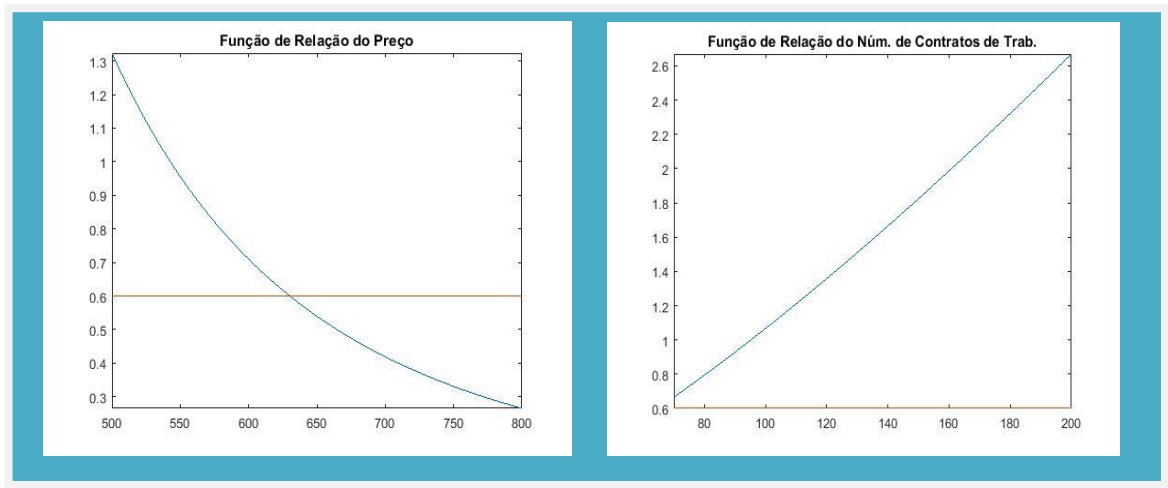
Figura 3. Função de Relação Negativa



Fonte: Elaboração Própria, 2018.

Já a função de relação positiva ocorre fazendo como que a sustentabilidade se apresente de forma crescente, como demonstrada, na representação dos gráficos, na figura 4, a seguir:

Figura 4. Função de Relação Positiva



Fonte: Elaboração Própria, 2018.

Diante dos exemplos visualizados nos gráficos representados pelas figuras 3 (três) e 4 (quatro), acima, pode-se compreender que a função de relação é negativa quando indica que quanto mais se gasta água, menor a sustentabilidade. O mesmo acontece para o uso de agrotóxicos. Já a função relação positiva ocorre quando indica que quanto maior o número de contrato de trabalho, mais desenvolvimento econômico e maior a sustentabilidade. Assim como para a função relação do preço de venda, quanto maior a venda do produto, maior a confiança econômica e o aumento da sustentabilidade.

Nesse sentido, como se pode visualizar nas restrições do índice de sustentabilidade (IS) proposto e do modelo construído, e, outrossim, nas funções relação de positividade e negatividade representadas por uma função não linear, esse é um problema de programação geométrica, tendo em vista os coeficientes serem formados pela soma de produtos de variáveis elevados à potência.

Nesse íterim, será apresentado no próximo tópico como se deu a implementação computacional, tendo em vista que o método de programação utilizado como técnica para a resolução do problema proposto é considerado uma programação geométrica, e necessita de uma ferramenta para a resolução de programas convexas no software MATLAB.

4.4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Diversas estratégias para resolver problemas de Programação Geométrica foram desenvolvidas, porém, para resolver o problema de Otimização e Sustentabilidade de Agroecossistemas aqui proposto, foi utilizado o *toolbox* CVX do software MATLAB, tendo em vista ser bastante utilizado para otimização convexa.

O MATLAB é um ambiente da computação científica utilizado para a execução de cálculo numérico, sua estrutura de dados fundamental é a matriz, que pode ter elementos reais ou complexos. Além disso, existem várias bibliotecas de funções adicionais, sendo estas denominadas por *toolboxes*, utilizadas para aplicações mais específicas. (BREZOLIN, 2015).

O CVX transforma o MATLAB em uma linguagem de modelagem, permitindo que restrições e objetivos sejam especificados usando a sintaxe de expressão padrão (BOYD, 2013). Por exemplo, considere o seguinte modelo de otimização convexa:

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar} & \|Ax-b\|_2 \\ \text{s.a} & Cx=d \\ & \|x\|_\infty \leq e \end{array}$$

Segundo Boyd (2013), o segmento de código a seguir gera e resolve uma instância aleatória desse modelo:

```
m = 20; n = 10; p = 4;
A = randn (m, n); b = randn (m, 1); C = randn (p, n); d = randn (p, 1); e = rand;
Cvx_início
Variável x(n)
Minimize (norm (A * x - b, 2) )
S.a
C * x == d
Norm (x, Inf) <= e
Cvx_fim
```

Em seu modo padrão, o CVX suporta uma abordagem particular para otimização convexa chamada de programação convexa disciplinada. Sob esta abordagem, funções convexas e conjuntos são construídos a partir de um pequeno conjunto de regras de uma análise convexa, e de uma biblioteca de base das funções e conjuntos convexas. Restrições e objetivos que são expressos usando essas regras são automaticamente transformados em uma forma canônica e são resolvidos (BOYD, 2013)

Nesse contexto, pode-se compreender que programas geométricos não são convexos, mas podem ser transformados em problemas convexos aplicando-se uma transformação. Para tanto, o CVX permitiu que esses tipos de problemas fossem construídos em sua forma inicial, ou seja, não convexa, transformando-os automaticamente em uma forma convexa solucionável e convertendo os resultados numéricos de volta para o problema original.

Diante do exposto sobre a implementação computacional realizada para a solução do problema de programação geométrica proposto pelo modelo de otimização não linear em questão, são apresentados no próximo capítulo os resultados encontrados para os quatro agroecossistemas em estudo, assim como as discussões sobre o índice de sustentabilidade estabelecido para a consecução do objetivo desse trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos após a implementação do *toolbox* CVX para o problema de programação geométrica desse modelo serão detalhados neste capítulo. A priori, serão apresentados os dados dos quatro agroecossistemas que foram utilizados para a validação do modelo. Em seguida serão expostos os resultados, e realizada uma discussão sobre a solução encontrada e o índice de sustentabilidade estabelecido para esses agroecossistemas.

5.1. TESTE DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

Foram selecionados para a validação do modelo formulado, 4 (quatro) agroecossistemas modernos do município de Ipanguaçu – RN, conforme (REIS, 2013), os quais atuam na produção da cultura de banana por meio de irrigação, e apresentam as seguintes informações, apresentadas no quadro 3.

Tabela 1. Características dos Agroecossistemas Modernos

ELEMENTOS DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA	AGRO 1	AGRO 2	AGRO 3	AGRO 4
Area total (ha)	113,11	150,92	274,39	174,56
Consumo de água (l/p/dia)	31	30,70	30,50	38,80
Consumo de energia(kwh/ha/dia)	4,80	3,60	3,50	3,60
Consumo de agrotóxico (l/ha)	0,5L	0,5	0,5	0,5
Plantas por hectare (p/ha)	1850	1850	1850	1850
Produção (ton)	5.644,19	5.722,89	16.035,35	9.740,45
Produtividade (ton)	49,90	37,92	58,44	55,40
Nº de contratos (unid)	182	152	426	190

Fonte: adaptado de Reis (2013).

Diante do exposto sobre as características dos agroecossistemas em estudo, pode-se verificar que são fundamentais para a constatação de que a solução obtida pelo modelo de otimização em agroecossistemas é viável ou não. Desse modo, os resultados identificados para cada agroecossistema, após a implementação computacional no MATLAB, serão evidenciados no próximo tópico.

5.2. RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO O *TOOLBOX* CVX PARA O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO GEOMÉTRICA

Os resultados encontrados para os quatro agroecossistemas são apresentados na tabela 2, abaixo, e em seguida, discutidos para uma melhor compreensão da solução alcançada. Cabe destacar que os agroecossistemas serão tratados como agros nesta seção.

Tabela 2. Solução do problema para os Agroecossistemas

VARIÁVEIS	AGRO 1	AGRO 2	AGRO 3	AGRO 4
Prod(ton)	10.305,75	13.713,47	24.747,77	15.823,10
Ar(ha)	85,96	114,70	208,54	132,66
Np(unid)	2.000	2.000	2.000	2.000
P(ton)	0.06	0.06	0.06	0.06
Pr (moeda)	620,81	620,89	621,02	620,91
E (Kwh/dia)	361,39	482,20	876,69	557,73
Ag (m ³)	0.03	0.03	0.03	0.03
Nc(unid)	66	89	161	102
V (moeda)	1.794,75	1.799,37	1.796,56	1.796,93
T (horas)	24	24	24	24
Agt (l)	4.12	4.04	4.05	4.05
Vazão	214,91	286,75	521,34	331,66
Nb (unid)	29	38	70	44
N (kg)	415,25	419,81	416,98	418,35
P (kg)	103,51	104,63	104,06	104,37
K (kg)	821,58	825,71	821,44	823,22
Pc	0.49	0.49	0.49	0.49

Fonte: Elaboração Própria (2018).

- ♦ Aumento da produção da cultura cultivada por planta (Prod)

Como se pode verificar, a produção total encontrada para os agroecossistemas estudados foi aumentada significativamente em relação à produção obtida anteriormente, tendo em vista que a produção do agro 1 passou de 5644,19 toneladas à produção de 10.305,75 toneladas, no agro 2 de 5.722,89 toneladas para 13.713,47 toneladas, no agro 3 de 16.035,35 toneladas para 24.747,77 toneladas, e no agro 4 de 9.740,45 toneladas para 15.823,10 toneladas. Cabe salientar que para encontrar esse valor da produção total para os agroecossistemas estudados, usou-se a fórmula: P (produção por planta) $\times$ Ar (área utilizada) $\times$ Np (número de plantas).

- ♦ Redução da área utilizada para o plantio (A_r)

Para encontrar a solução do problema, o modelo reduziu a área utilizada para o plantio em cada agroecossistema, o agro 1 com 113,11ha obteve como solução a redução para 85,96 ha, enquanto o agro 2 com 150, 92 ha apresentou 114, 70 ha para o modelo, já o agro 3 com 274, 39 ha passou a ter 208, 54 ha e o agro 4 de 174, 56 ha apresentou uma área de 132, 66 para que assim o plantio ocorra de forma sustentável.

- ♦ Aumento do número de plantas ou mudas (N_p)

A quantidade de plantas por hectare apresentada pelo modelo aumentou consideravelmente em relação ao número de plantas que se produz por hectare em cada agroecossistema, passando de 1850 por haectare para 2000 plantas por hectare.

- ♦ Consumo de energia diário (E)

O parâmetro estabelecido para a sustentabilidade do uso de energia foi um valor abaixo de 3,72 kwh/ha/dia, porém com o aumento do número de plantas, e por conseguinte da produção, também obteve-se um aumento no consumo de energia, considerando que os agroecossistemas 1, 2, 3 e 4 apresentavam respectivamente, o consumo diário de 4,02kwh/ha/dia; 3,60 kwh/ha/dia; 3,50kwh/ha/dia e 3,60kwh/ha/dia, e com o modelo apresentaram o consumo médio de 4,20 kwh/ha/dia. No entanto, pode-se considerar que este aumento não influencia negativamente no nível de sustentabilidade desses agroecossistemas.

- ♦ Consumo de agua consumo de água utilizado (A_g)

Quanto ao consumo de água, verifica-se que os resultados encontrados para os quatro agros apresentam-se de forma satisfatória, na medida em que obtiveram o consumo de 30l/p/dia (o parâmetro utilizado para o consumo adequado de água de forma sustentável na cultura de banana), enquanto, anteriormente, apresentavam, respectivamente, para os agros 1, 2, 3 e 4, o consumo de 31 l/p/dia; 30,70 l/p/dia; 30,70 l/p/dia; e 38,80 l/p/dia. Pode-se destacar que o modelo apresenta solução ótima para os agros, principalmente para o agro 4, na medida em que se reduz consideravelmente o consumo utilizado de água para a plantação diária nesse agroecossistema.

- ♦ Número de contrato de trabalho (Nc)

Os resultados encontrados para o número de contrato de trabalho dos agroecossistemas foram inferiores, tendo em vista que também foi reduzida a área utilizada para o plantio em todos os agroecossistemas, necessitando, assim, que o número de contrato de trabalho seja menor ou igual à área utilizada para o plantio. Logo os agroecossistemas 1, 2, 3 e 4 apresentaram, respectivamente, os seguintes números de contratos: 66 contratos, 89 contratos, 161 contratos, e 102 contratos. Esses resultados diferenciam-se bastante das informações iniciais, conforme se pode observar na tabela 1, onde apresenta a quantidade de 182 contratos para o agro 1; 152 contratos para o agro 2; 426 contratos para o agro 3 e 190 contratos para o agro 4.

- ♦ Valor do contrato de trabalho unitário (V)

Para o valor do contrato de trabalho foi considerada a média próxima a dois salários mínimos para trabalhadores da zona rural, aproximada ao valor de R\$1.700,00, aferindo-se, portanto, que os resultados encontrados para o salário que os agroecossistemas podem pagar são satisfatórios, tendo em vista que apresentaram valores acima do parâmetro estabelecido para a atividade agrícola, quais sejam: Agro 1 -R\$ 1.794,75; Agro 2 - R\$1.799,37; Agro 3- R\$1.796,56 e Agro 4 - R\$ 1.796,93.

- ♦ Tempo de utilização da bomba d' água para irrigação (T)

O tempo de processamento da bomba d'água foi estabelecido sendo menor ou igual a 20 horas. E os resultados obtidos foram aproximadamente de 24 horas, para os quatro agroecossistemas. Logo, pode-se considerar que precisam de maior tempo de processamento para a bomba d'água, o que justifica pela maior quantidade de plantas, e por consequentemente, de uma maior produção.

- ♦ Quantidade de agrotóxicos utilizados (Agt)

Para os quatro agroecossistemas foi utilizado o parâmetro de 0,5L/ha para o uso adequado de agrotóxicos na produção da cultura de banana, e a solução obtida pelo modelo

apresenta como resultados para cada agro uma média de 0,4L/ha. Logo, verifica-se que os resultados foram bastante satisfatórios para a sustentabilidade desses agroecossistemas.

- ♦ Vazão

O valor obtido para a vazão da água reflete a pressão da água e a velocidade de escoamento nos sistemas de irrigação dos agroecossistemas estudados, sendo encontrados para os agros 1, 2, 3 e 4, respectivamente, 214,91 m³/s.; 286,75m³/s; 521,34m³/s; e 331,66m³/s.

- ♦ Número de bombas (Nb)

A quantidade de bombas necessárias em agroecossistemas que trabalham com irrigação na cultura de banana foram as seguintes para os agros 1, 2, 3 e 4, respectivamente, 29 bombas de 1cv; 38 bombas de 1cv; 70 bombas de 1cv; 44 bombas de 1cv.

- ♦ Preço de Mercado (Pr)

Os resultados encontrados para os preços de venda da banana (ton) consideram os preços máximos e mínimos encontrados no mercado, conforme o quadro 7, na página 73. Logo, pode-se verificar que foram obtidos preços satisfatórios de venda do produto para os agroecossistemas 1, 2, 3 e 4, respectivamente, quais sejam: R\$620,81, R\$620,89, R\$621,02 e R\$620,91. Esse resultado corrobora para a competitividade do produto no mercado, implicando na confiança econômica, e consequentemente na sustentabilidade desses agroecossistemas.

- ♦ Quantidade de fertilizantes do tipo k a ser utilizada (F_{tk}– N, P e K)

Os resultados atingidos para as quantidades de fertilizantes (N - Nitrogênio, P – Fósforo e K - Potássio) que devem ser utilizadas de forma sustentável na produção da cultura de banana irrigada dos agroecossistemas 1, 2, 3 e 4, respectivamente, foram os seguintes: N - (415,25 kg, 419,81 kg, 416,98 kg, e 418,35kg); P - (103,51 kg, 104,63 kg, 104,06 kg, e 104,37kg); K - (821,58 kg, 825,71 kg, 821,44 kg, e 823,22 kg). Pode-se ressaltar que esses resultados são ótimos, confirmando que a quantidade de fertilizantes aplicadas para a

produção esperada de agroecossistemas que trabalham com a cultura de banana irrigada estão dentro da média do estabelecido, tendo em vista que foram utilizados como parâmetro os limites máximos e mínimos estabelecidos no quadro 7, página 73, conforme (Borges e Souza, 2004).

- ♦ Percentual do valor da produção gasto com custos (PC)

Os resultados encontrados para os 4 (quatro) agroecossistemas no que tange ao percentual gasto com custo está dentro do limite proposto pela restrição de produtividade, na qual os custos devem ocupar no máximo 50% do valor total da produção. Logo, verifica-se que os agros gastam até 49% do valor obtido na produção, confirmando que o modelo proposto contribui para o aumento da produtividade nesses agroecossistemas estudados.

5.3. SOLUÇÃO DO MODELO

Diante do que foi demonstrado nos resultados encontrados com a implementação do modelo de otimização, pode-se concluir que a função objetivo de maximizar a produção, representada pelas variáveis *PrPNpAr* (preço, produção por planta, número de plantas e área utilizada) foi alcançada, confirmando assim a validação do modelo, tendo em vista que a solução é ótima para os quatro agroecossistemas testados.

Destaca-se ainda, que o modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas aqui validado, demonstra a capacidade que os agroecossistemas têm de trabalhar, sustentavelmente, reduzindo os custos com o consumo de energia, consumo de água, uso de agrotóxicos e fertilizantes; adequando a produção à área de utilização de terra para plantio, e por sua vez gerando uma maior empregabilidade, pois mesmo reduzindo a área de plantação e quantidade de emprego, aumenta-se o número de plantas e, por sua vez a produção total; aumentando os lucros pela venda do produto, pelo alcance de preço competitivo, além de dar mais condições aos trabalhadores desses agroecossistemas de terem a oportunidade de um contrato de trabalho efetivo.

Nesse contexto, compreende-se a importância de modelos de otimização que visem a maximização dos lucros da produção, reduzindo os custos e mantendo os níveis de sustentabilidade estáveis. Dessa forma, será verificado no próximo tópico, se o índice de sustentabilidade (IS) proposto nesse estudo demonstra que o nível de sustentabilidade desses

agroecossistemas permaneceram estáveis, mesmo com o objetivo do modelo de maximizar a produção.

5.4. ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE (IS)

Foi estabelecido um índice de sustentabilidade para medir a sustentabilidade dos agroecossistemas selecionados para o estudo, e por sua vez, confirmar se o nível de sustentabilidade encontrado pode ser considerado estável ou ótimo, conforme o IDS (S³) Sepúlveda (2008). Desse modo, quando o estado de sustentabilidade do agroecossistema estiver entre os níveis de 0-0,2 é considerado em nível de colapso, entre 0,2-0,4 em estado crítico, entre 0,4 – 0,6 em estado instável, entre 0,6 a 0,8 é considerado estável e de 0,8 a 1,00, em nível ótimo de sustentabilidade.

No quadro abaixo, pode-se verificar o valor do índice de sustentabilidade (IS) obtido pelos 4 (quatro) agroecossistemas:

Tabela 3. O índice de sustentabilidade (IS)

INDICADORES SUSTENTÁVEIS	AGRO 1	AGRO 2	AGRO 3	AGRO 4
Consumo da Água	0.99	0.99	0.99	0.99
Uso de Agrotóxicos	1.00	1.00	1.00	1.00
Número de Contratos	0.62	0.62	0.62	0.62
Consumo da Energia	0.66	0.66	0,66	0,66
Preço de Venda	0.63	0.63	0,63	0,63
IS	0.78	0.78	0.78	0.78

Fonte: Elaboração Própria (2018).

Conforme foi visto na função do índice de sustentabilidade (IS) proposto:

$$\frac{1}{5} (\min(Aid^{-\beta} Ag^{-\beta}, 1) + \min(Enid^{-\beta} E^{\beta}, 1) + \min((Das)^{-\beta} Agt^{\beta}, 1) + \min(Nemp^{-\theta} Nc^{\theta}, 1)) + \min(Precomin^{-\beta} Pr^{\beta}, 1)),$$

O índice de sustentabilidade (IS) visa manter os custos com o uso de agrotóxicos, o consumo de energia e água, números de contratos e preço de venda dentro da faixa do limite ótimo de sustentabilidade, qual seja, o valor 1,0.

Logo, o indicador do consumo de água para os 4 agros obteve o valor de 0,99, o que significa que a obtenção de um nível ótimo de sustentabilidade. O indicador do uso de

agrotóxicos obteve o valor 1 (um) para os 4 agroecossistemas, apresentando nível ótimo de sustentabilidade. Já o indicador do número de contratos obteve a média de 0,62 para os quatro agroecossistemas, estando acima da faixa considerada estável de sustentabilidade. O mesmo aconteceu para os indicadores do consumo de energia e do preço de venda, que apresentaram médias de 0,66 e 0,63, respectivamente, para os 4 agros, no que tange aos níveis estáveis de sustentabilidade.

Diante da mensuração dos indicadores, obteve-se a média aritmética do índice de sustentabilidade para os 4 agros, qual seja, 0,78, podendo-se aferir que os resultados encontrados para a maximização da produção dentro do nível estável de sustentabilidade dos quatro agroecossistemas são positivos, uma vez que o índice de sustentabilidade encontrado se situa na faixa de sustentabilidade considerada estável, conforme Sepúlveda (2008). E, outrossim, não apresentam diferenças significativas quanto ao nível estável de sustentabilidade desses agroecossistemas.

Nesse contexto, pode-se considerar que a solução para o problema é ótima, pois foi identificado pelo Índice de Sustentabilidade proposto por este estudo, que o modelo de otimização implementado permite um estado estável de sustentabilidade para esses agroecossistemas, mesmo com a efetivação da maximização da produção.

Diante da exposição e discussões dos resultados encontrados, no próximo capítulo serão apresentadas as conclusões dessa pesquisa, tendo como foco o alcance dos objetivos propostos, as contribuições para o meio acadêmico, as limitações encontradas e a possibilidade de pesquisas futuras.

6. CONCLUSÃO

Para que haja o desenvolvimento da sustentabilidade em agroecossistemas, é de fundamental importância a manutenção dos recursos naturais desse ambiente produtivo, com a adoção de práticas e técnicas agrícolas efetivas para a redução dos danos causados à vegetação, ao solo, ao uso da água – e por sua vez, das condições de sobrevivência humana. A preocupação com essas práticas permite que esse sistema seja capaz de se recuperar das perturbações causadas pelo manejo e colheita, contribuindo para níveis estáveis de sustentabilidade em agroecossistemas que apresentam como prioridade a resiliência, a produtividade, a equidade e a autonomia.

Destarte, os atributos dos agroecossistemas - quais sejam: produtividade, estabilidade, confiabilidade, resiliência, adaptabilidade, equidade, e auto-suficiência - são considerados elementos-chave na relação com os três pilares da sustentabilidade, na medida em que buscam: um nível adequado de bens, serviços e retorno econômico; um estado de equilíbrio dinâmico com nível de produtividade constante, em condições normais, de choque ou de estresse para lidar com as mudanças das condições socioambientais; uma distribuição de custos e benefícios entre os diferentes usuários de recursos; a capacidade do sistema de regular e controlar suas relações com o mercado externo e de planejamento estratégico para a tomada de decisões de acordo com as prioridades, a identidade e os valores do sistema.

Nesse sentido, essa pesquisa surgiu a partir da necessidade de estudar os modelos de otimização como uma ferramenta de maximização da produtividade em agroecossistemas, mantendo os níveis estáveis da sustentabilidade, tendo como intuito uma maior contribuição para o desenvolvimento e produtividade de agroecossistemas pautados no equilíbrio do tripé da sustentabilidade – as dimensões sociais, ambientais e econômicas.

No que tange à problemática e questão central desta dissertação: quais as relações existentes entre produtividade, manejo e resiliência que permitem otimizar a produção em agroecossistemas atendendo a limiares de sustentabilidade existentes na literatura? - pode-se confirmar que foi respondida, na medida em que o desenvolvimento dessa pesquisa tornou possível definir quais as relações existentes entre produtividade, manejo e resiliência, e como quantificar e modelar tais fenômenos atendendo a limiares de sustentabilidade existentes na literatura, conforme será apresentado a seguir quanto às conclusões do objetivo proposto.

Diante do exposto, enfatiza-se que o objetivo geral do estudo em tela foi alcançado, tendo em vista que a proposta de construir um modelo de otimização que determine a maior

produção possível de agroecossistemas, mantendo-os dentro de um nível estável de sustentabilidade, dado um índice de sustentabilidade, foi efetivamente aplicada.

Nesse íterim, para alcançar esse objetivo foram estabelecidos sete objetivos específicos, os quais foram plenamente atendidos, conforme se visualizou nos resultados apresentados. A seguir será feita uma exposição de como os mesmos foram alcançados.

O primeiro objetivo específico dessa dissertação foi explorar os conceitos e abordagens de sustentabilidade, agricultura sustentável, sistemas de indicadores sustentáveis, agroecossistemas, modelagem matemática, programação não linear e programação geométrica. Sendo esse objetivo atingido por meio da realização de uma revisão sistemática da literatura, a qual permitiu compreender melhor a temática por meio de suas etapas de identificação, análise e seleção das informações que melhores se adequam ao alcance dos objetivos propostos quanto à fundamentação desta dissertação.

O segundo objetivo específico foi selecionar agroecossistemas para a implementação da modelagem matemática. Logo, foram selecionados 4 (quatro) agroecossistemas de Ipanguaçu – RN, do estudo realizado por Reis (2013), tendo em vista conter os indicadores de sustentabilidade de agroecossistemas, obtidos por meio da implementação do instrumento IDS (S^3) pela autora, contribuindo, dessa forma, com informações pertinentes e características marcantes do ambiente para a realização da modelagem matemática.

O terceiro objetivo trata da definição das relações entre os agentes do agroecossistema e os indicadores de sustentabilidade do IDS (S^3). Tendo em vista a necessidade premente do modelo representar as características dos agroecossistemas escolhidos para a formulação e resolução do problema, de forma a atender às três dimensões da sustentabilidade, permitindo a seleção de qual desses indicadores melhor se encaixavam para a construção do modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas. Para tanto, abordou-se uma visão sobre os modelos de otimização, os indicadores de sustentabilidade, e os agroecossistemas – para compreender os conjuntos de variáveis de decisões que influenciam a produção dos agroecossistemas, com base no tripé da sustentabilidade.

O quarto objetivo foi construir o modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas, a partir dos elementos de decisão em agroecossistemas, sendo esses vinculados aos indicadores de sustentabilidade selecionados, definindo-se, assim, as variáveis, os parâmetros tecnológicos e as restrições para a formulação do problema.

O quinto objetivo de propor um índice de sustentabilidade foi alcançado, na medida em que a solução encontrada para o problema é ótima, pois foi identificado pelo Índice de Sustentabilidade proposto por este estudo, que o modelo de otimização construído permite um

estado estável de sustentabilidade para esses agroecossistemas, mesmo com a implementação da maximização da produção.

Para o sexto objetivo específico de aplicar o método de programação geométrica para a resolução do problema, realizou-se uma implementação computacional no MATLAB, a qual permitiu encontrar uma solução ótima para o problema, na medida em que mesmo se maximizando a produção dos agroecossistemas estudados, verificam-se níveis estáveis de sustentabilidade, conforme foi identificado pelo Índice de Sustentabilidade (IS) proposto.

E por fim, o sétimo objetivo de apresentar soluções que contribuam para fomentar a sustentabilidade de agroecossistemas, foi alcançado pela efetivação dos resultados encontrados, ressaltando-se que não se quis comparar qual o melhor resultado entre os agroecossistemas reais e o modelo aplicado, mas sim a constatação de que a construção do modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas encontrou resultados parecidos com o ambiente real, o que confirma a qualidade do modelo apresentado, levando-se à conclusão de que os objetivos desse estudo foram alcançados.

Diante do exposto, pode-se concluir que o tema otimização, sustentabilidade e agroecossistema foi um grande **desafio**, inicialmente, por não terem sido encontradas muitas referências na literatura que abordem a modelagem matemática para um completo diagnóstico de sustentabilidade, sendo necessários mais subsídios e um estudo mais aprofundado. Outrossim, destaca-se a **contribuição** para o meio acadêmico por se considerar esta pesquisa um diferencial em relação aos modelos de otimização encontrados na literatura no que tange ao tripé da sustentabilidade, e, principalmente, pela implementação da programação geométrica para a resolução do problema e validação do modelo em agroecossistemas.

Nesse contexto, a pesquisa apresenta como **limitação** a utilização dos dados secundários para a construção do modelo, já que não houve contato com os gestores e membros dos agroecossistemas analisados, uma vez que o estudo se restringiu aos dados de um estudo selecionado. Logo, a falta de informação necessária dificultou o processo de construção do modelo.

Cabe ressaltar que na validação deste modelo esse mix pode não ser totalmente implementável. No entanto, esta pesquisa revelou uma direção a ser seguida para **pesquisas futuras**, e principalmente, para pequenos agroecossistemas, tendo em vista demonstrar que um processo de gestão que envolva a modelagem matemática pode proporcionar muitas vantagens para o alcance da produtividade com níveis de estabilidade, equilíbrio e resiliência em consonância com os três pilares da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ALFARO, J. F. J. MARIN V. **Uso de agua y energia para riego en America Latina**. Califórnia: UNESCO, 1991. Disponível em: <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/uso_eficiente/alfaro.html>. Acesso em: 4 maio 2018.

ALTIERI, M.A. **Agroecology**: the scientific basis of alternative agriculture. Berkeley: The Repro Express, 1983.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia** – A dinâmica produtiva da agricultura sustentável. 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004. 110p.

ALTIERI, M. **Agroecologia**: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável. 5a ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 110p. Disponível em: <https://www.socla.co/wp-content/uploads/2014/Agroecologia-Altieri-Portugues.pdf>. Acesso em 30 nov. 2016.

ÁLVAREZ, M. E. P.; BÁRCENA, M. M.; GONZÁLEZ, F. A. A Review of Sustainable Machining Engineering: Optimization Process Through Triple Bottom Line. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 138, n. 10, p. 100801, 2016. Disponível em: [doi: 10.1115/1.4034277](https://doi.org/10.1115/1.4034277). Acesso em 19 mar. 2017.

ALUEVA, A. PEREZ, A. **Un nuevo algoritmo em programacion signomial**. Trabajos de investigation operativa. Vol.7, num 1, p 135-156. 1992.

ARAÚJO, R. M. **Análise da sustentabilidade**: o saber acadêmico e o saber local em agroecossistemas familiares de base ecológica no sul do Rio Grande do Sul. 2014. 204 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS. Disponível em: <http://www.guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/2973>. Acesso em 30 nov. 2016.

ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa Operacional**. ISBN 85-352-1454-3, v. 8. Rio de Janeiro, Elsevier, 2007.

ASTIER, M. *et al.* Sustainability indicators, alternative strategies and trade-offs in peasant agroecosystems: analysing 15 case studies from Latin America. **International journal of agricultural sustainability**, v. 9, n. 3, p. 409-422, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14735903.2011.583481>. Acesso em 19 mar. 2017.

BAVARESCO, D. **Modelagem Matemática e Controle de um Atuador Pneumático**. 2007. 107f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS. Disponível em: <http://www.simmer.unijui.edu.br/Dissertacoes/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Delair%20Bavaresco.pdf>. Acesso em 25abr. 2017.

BEIGHTLER, C.S; PHILLIPS, D.T. **Applied Geometric Programming**, John Wiley & Sons, New York.1976.

BIGGS, E. M. *et al.* Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. **Environmental Science & Policy**, v. 54, p. 389-397, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>. Acesso em 19 mar. 201

BORGES, A. L. **Sistemas de produção**: cultivo da banana para o agropolo Jaguaribepodi.Cruz das Almas: EMBRAPA, 2002. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 07abr 2018.

BORGES, A.L.; SOUZA, L. S. **O cultivo da bananeira**. Cruz das Almas: EMBRAPA, 2004.

BOUKHERROUB, T.*et al.* An integrated approach for sustainable supply chain planning. **Computers & Operations Research**, v. 54, p. 180-194, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.09.002>. Acesso em 19 mar. 2017.

BOYD, M. G. **CVX: Matlab software for disciplined convex programming**, version 2.0 beta. 2013. Disponível em: <http://cvxr.com/cvx>. Acesso em 19 jul. 2018.

BRASIL. Lei 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 26 maio 2012. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651compilado.htm>. Acesso em: 26 fev 2018.

BREZOLIN, A, P. **Modelagem matemática para otimização e previsibilidade de produtividade do trigo pelas formas de fornecimento do nitrogênio**.2015. 149 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

BRUSSAARD, L.; DE RUITER, P. C.; BROWN, G. G. Soil biodiversity for agricultural sustainability. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 121, n. 3, p. 233-244, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.013>. Acesso em 19 mar. 2017.

CABELL, J; OELOFSE, M. An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. **Ecology and Society**, v. 17, n. 1, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-04666-170118>. Acesso em 19 mar. 2017.

CAMELO, G. L. P.; CÂNDIDO, G.A. Sustentabilidade de agroecossistemas familiares de cultivo do abacaxi irrigado versus sequeiro em Touros (RN). In: SILVA, V.P. da; CÂNDIDO, G.A (Orgs). **Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas: aplicações em diversos tipos de cultivo e práticas agrícolas do Rio Grande do Norte**. ISBN 978-85-8161-070-2. 258p. Natal: IFRN, 2015.

CIRILO, J.A., Programação não Linear Aplicada a Recursos Hídricos. In: Porto, R.L.L. et al., **Técnicas Quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. ABRH, 1ª edição, PP. 305-356, Editora da Universidade – UFRGS, 1997.

CISNEROS-SAGUILÁN, P.*et al.* Current Epistemological Perceptions of Sustainability and Its Application in the Study and Practice of Cattle Production: A Review. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 39, n. 8, p. 885-906, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/21683565.2015.1050148> Acesso em 19 mar. 2017.

COMPANHIA ENERGIA ELÉTRICA DO RIO GRANDE DO NORTE. Disponível em: < http://www.cosern.com.br/aplicacoes/solicitacao_servicos.asp?c.> Acesso em: 10 mar.2018.

CORREIA, I. V. **Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas em transição agroecológica na região sul do Rio Grande do Sul**. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS. Disponível em: <http://wp.ufpel.edu.br/consagro/files/2010/01/Corr%C3%A7%C3%A3o-Inez-Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em 30 nov. 2016.

COSTA, A. A. V. M. R. **Agricultura sustentável II: Avaliação**. Rev. de Ciências Agrárias, dez. 2010, vol.33, nº 2, p.75-89. ISSN 0871-018X.

DE CAMINO, R.; MULLER, S. **Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales - Bases para establecer indicadores**. San Jose: IICA/GTZ, 1993. (Serie Documentos de Programas, 38).

DE MEYER, A. *et al.* Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 31, p. 657–670, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.036>. Acesso em 01 dez. 2016.

DEPONTI, C. M.; ECKERT, C.; AZAMBUJA, J. L. B. D. Estratégia para construção de indicadores para avaliação da sustentabilidade e monitoramento de sistemas. **Agroecologia e desenvolvimento rural sustentável**, v. 3, n. 4, p. 44-52, 2002. Disponível em: <http://www.ernestoamaral.com/docs/indsoc-122/biblio/Deponti2002.pdf>. Acesso em 08 mai. 2017.

DI FELICE, V. *et al.* A multivariate analysis for evaluating the environmental and economical aspects of agroecosystem sustainability in central Italy. **Journal of environmental management**, v. 98, p. 119-126, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.015>. Acesso em 19 mar. 2017.

DUFFIN, R.J.; PETERSON, E.L.; ZENER, C. **Geometric Programming - Theory and Applications**, John Wiley & Sons, New York. 1967.

EHLERS, E. **Agricultura Sustentável**: Origens e perspectivas de um novo paradigma. 2.ed. Guaíba: Agropecuária, 1999. 157p.

ELKINGTON, J. **Sustentabilidade, canibais com garfo e faca**. São Paulo: M. Books do Brasil Editora Ltda., 2012.

FILAR, J. A.; KRAWCZYK, J. B.; AGRAWAL, M. R. Sustainability screw: role of relative production and abatement time scales. **Journal of the Operational Research Society**, v. 66, n. 8, p. 1259-1269, 2015. Disponível em: [doi:10.1057/jors.2014.39](https://doi.org/10.1057/jors.2014.39). Acesso em 19 mar. 2017.

FIRMINO, M. B. M.; CURI, W.F.; CURI, R.C.; LINS, G.M.L., **Otimização econômica de redes malhadas destinadas a sistemas pressurizados de irrigação**. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2004, São Luís. Anais.

FITSCHÉ, H., **Programação não Linear**: análise e métodos, 170p. Editora da Universidade – USP, 1978.

FURLANETO, E.L.; CÂNDIDO, G.A.; MARTINS, M. D. F. M. Sustentabilidade em Arranjos produtivos locais: uma proposta metodológica de análise. In: CÂNDIDO, G.A. (Org). **Desenvolvimento Sustentável e Sistemas de Indicadores de Sustentabilidade**: Formas de aplicações em contextos geográficos diversos e contingências específicas. ISBN: 978-85-8001-009-1. Campina Grande-PB. Ed. UFCG, 2010.

GARBIE, I. H. Sustainability optimization in manufacturing enterprises. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 504-509, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.085>. Acesso em 19 mar. 2017.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos**. ISBN: 978-85-314-0904-2. 2 ed. Ver e ampl. 1. Reimp - editora da universidade de são Paulo, São Paulo, 2009.

GHADERI, H.; PISHVAEE, S.; MOINI, A. Biomass supply chain network design: an optimization-oriented review and analysis. **Industrial Crops and Products**, v. 94, p. 972–1000, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.027>. Acesso em 01 dez. 2016.

GLIESSMAN, S. R. Sustainable agriculture: an agroecological perspective. **Advances in Plant Pathology**. Santa Cruz, California: University of California: Academic Press, v. 11, p. 45-57, 1995. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0736-4539\(06\)80005-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0736-4539(06)80005-X). Acesso em 01 dez. 2016.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia** – Processos Ecológicos em Agricultura Sustentável. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 653p.

GOLDBARG, M. C; LUNA. H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Isbn 978-85-352-1250-5. 2 ed.. Elsevier, 9 impressao. Rio de janeiro.2005.

GROOT, J. C.J; OOMEN, G. J.M; ROSSING, W. A.H. Multi-objective optimization and design of farming systems. **Agricultural Systems**, v. 110, p. 63-77, 2012. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.012>. Acesso em 19 mar. 2017.

GUIMARÃES, R. P.; FEICHAS, S. A. Q. Desafios na construção de indicadores de sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**, v. 12, n. 2, p. 307-323, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/asoc/v12n2/a07v12n2>. Acesso em 25.abr. 2017.

GUZMÁN, G I.; DE MOLINA, M. G.; ALONSO, A. M. The land cost of agrarian sustainability. An assessment. **Land Use Policy**, v. 28, n. 4, p. 825-835, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.01.010>. Acesso em 19 mar. 2017.

HENNERON, L. *et al.* Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. **Agronomy for sustainable development**, v. 35, n. 1, p. 169-181, 2015. Disponível em: [doi:10.1007/s13593-014-0215-8](https://doi.org/10.1007/s13593-014-0215-8). Acesso em 19 mar. 2017.

IBGE. Instituto brasileiro de geografia e estatística. Dados da produção e consumo de banana no Brasil. 2018. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

JAYARAMAN, R. et al. A Weighted Goal Programming model for planning sustainable development applied to Gulf Cooperation Council Countries. **Applied Energy**, v. 185, p. 1931-1939, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.065>. Acesso em 19 mai. 2017.

LACERDA, R. T. DE O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gest. Prod.**, São Carlos, vol. 19, n. 1, p. 59-78, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/gp/v19n1/a05v19n1>. Acesso em 05 dez. 2016.

LACHTERMARCHER, G. **Pesquisa Operacional na tomada de decisões**. ISBN 978-85-7605-093-. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2009.

LIMA JR. E. F.; NASCIMENTO, R. Q. Um método contínuo para solução de problemas de localização. **XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. 2006. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2006/pdf/arg0112.pdf>. Acesso em 19 jul. 2018

LIU, Z.; HUANG, Y. Sustainability enhancement under uncertainty: a Monte Carlo-based simulation and system optimization method. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 17, n. 7, p. 1757-1768, 2015. Disponível em: [doi:10.1007/s10098-015-0916-y](https://doi.org/10.1007/s10098-015-0916-y). Acesso em 19 mar. 2017.

LOWRANCE, R.; STINNER, B.R.; HOUSE, S. **Agricultural ecosystems**. New York: Wiley-Interscience, 1984.

MARTINS, M. D. F. M.; CÂNDIDO, G.A. **índice de desenvolvimento sustentável para localidades: uma proposta metodológica de construção e análise**. In: CÂNDIDO, G.A. (Org). **Desenvolvimento Sustentável e Sistemas de Indicadores de Sustentabilidade: Formas de aplicações em contextos geográficos diversos e contingências específicas**. ISBN: 978-85-8001-009-1. Campina Grande-PB. Ed. UFCG, 2010.

MARZALL, K.; ALMEIDA, J. Indicadores de Sustentabilidade para Agroecossistemas. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.17, n.1, p.41-59, jan./abr. 2000.

MASERA, O.; ASTIER, M.; LÓPEZ-RIDAURA, S. **Sustentabilidad Y Manejo de Recursos Naturales: el marco de evaluación MESMIS**. México: Mundi-Prensa, 1999. 109p.

MÉSZÁROS, D. *et al.* Farm-level environmental performance assessment in Hungary using the Green-point system. **Studies in Agricultural Economics**, v. 117, n. 3, p. 131-139, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.7896/j.1426>. Acesso em 19 mar. 2017.

NASCIMENTO, R. Q., **Métodos de pontos Interiores para Programação Geométrica**. 1996. 153f. Tese (Doutorado). COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, R. Q., OLIVEIRA P.R. A globally convergente Infeasible Interior Point Method for Linearly Constrained convex programming Interior Points On Line, 2000. Disponível em: <http://www.mcs.anl.gov/otc/InteriorPoint> .Acesso em 19 jul. 2018

NASCIMENTO, R. Q; LIMA JR; SANTOS, R. M. de O. A continuous strategy to solve a class of mixed optimization problems. **Discrete Applied Mathematics** v. 164, p. 264–275, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dam.2011.12.008>. Acesso em 19 jul. 2018.

PERROT, N. *et al.* Some remarks on computational approaches towards sustainable complex agri-food systems. **Trends in Food Science & Technology**, v. 48, p. 88-101, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.10.003>. Acesso em 19 mar. 2017.

PHAM, L. V.; SMITH, C. Agricultural sustainability in developing countries: An assessment of the relationships between drivers and indicators in Hoa Binh Province, Vietnam. **Agroecology and sustainable food systems**, v. 37, n. 10, p. 1144-1186, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/21683565.2013.833153>. Acesso em 19 mar. 2017.

PINHEIRO, R. B. N. **Um método previsor-corretor primal-dual de pontos interiores barreira logarítmica modificada, com estratégias de global e de ajuste cúbico, para problemas de programação não-linear e não-convexa**. 2012. 158f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista.

PLIENINGER, T. *et al.* Mainstreaming ecosystem services through reformed European agricultural policies. **Conservation Letters**, v. 5, n. 4, p. 281-288, 2012. Disponível em: [DOI: 10.1111/j.1755-263X.2012.00240.x](https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00240.x). Acesso em 19 mar. 2017.

PRETTY, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1491, p. 447-465, 2008. Disponível em: [DOI: 10.1098/rstb.2007.2163](https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163). Acesso em 19 mar. 2017.

RADICS, R. I; DASMOHAPATRA, S.; KELLEY, S. S. Use of linear programming to optimize the social, environmental, and economic impacts of using woody feedstocks for pellet and torrefied pellet production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining.**, v. 10, n. 4, p. 446-461, 2016. Disponível em: doi: 10.1002/bbb. Acesso em 19 mar. 2017.

REIDSMA, P. *et al.* Sustainable agricultural development in a rural area in the Netherlands? Assessing impacts of climate and socio-economic change at farm and landscape level. **Agricultural Systems**, v. 141, p. 160-173, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.10.009>. Acesso em 19 mar. 2017.

REIS, L. M. M. **Avaliação de Sustentabilidade de Agroecossistemas de Bananeira Irrigada de formas diferentes de produção moderna e tradicional: O Caso de Ipanguaçu-RN.** 2013. 211f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande.

ROBOREDO, D.; BERGAMASCO, S. M. P. P.; BLEICH, M. E.. Aggregate index of social–environmental sustainability to evaluate the social–environmental quality in a watershed in the Southern Amazon. **Ecological Indicators**, v. 63, p. 337-345, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.042>. Acesso em 19 mar. 2017.

SABATINO, S.; FRANGOPOL, D.; DONG, Y. Sustainability-informed maintenance optimization of highway bridges considering multi-attribute utility and risk attitude. **Engineering Structures**. vol.102, p. 310–321, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.030>. Acesso em 01 dez. 2016.

SEMPORE, A. *et al.* Relevancy and role of whole-farm models in supporting smallholder farmers in planning their agricultural season. **Environmental Modelling & Software**, v. 68, p. 147-155, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.015>. Acesso em 19 mar. 2017.

SEPÚLVEDA S., **Gestión del desarrollo sostenible en territorios rurales: métodos para la planificación.** San José, C.R. : IICA, 2008. 416 p.

SICHE, R. *et al.* Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & sociedade**, v.2, p. 137-148, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/asoc/v10n2/a09v10n2>. Acesso em 08 mai. 2017.

SILVA, A. M. D. **Contribuição à avaliação da sustentabilidade na produção agrícola familiar da mamona na Paraíba.** 2010. 239f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGE. Universidade Federal da Paraíba, João pessoa. Disponível em: <http://tede.biblioteca.ufpb.br/handle/tede/5288>. Acesso em 25 abr. 2017.

SILVA, C. L. D. **Desenvolvimento sustentável: um modelo analítico integrado e adaptativo**. In: SILVA, C. L. D. (Org). **Desenvolvimento sustentável: um modelo analítico integrado e adaptativo**. ISBN: 85-326.3393-5. Petrópolis, RJ. Ed. Vozes, 2006.

SILVA, E.E. **Otimização de estruturas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos**. 2001. 131f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVA, V. P. D.; CÂNDIDO, G.A. **Sustentabilidade de geossistema familiar de produção de mandioca alternativo versus convencional**. . In: SILVA, V.P. da; CÂNDIDO, G.A (Orgs). **Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas: aplicações em diversos tipos de cultivo e práticas agrícolas do Rio Grande do Norte**. ISBN 978-85-8161-070-2. 258p. Natal: IFRN, 2015.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional: uma visão geral**. ISBN: 978-85-7605-150.8 ed. São Paulo; Pearson Prentice Hall, 2008.

TAN, F.; LU, Z. Assessing regional sustainable development through an integration of nonlinear principal component analysis and Gram Schmidt orthogonalization. **Ecological Indicators**, v. 63, p. 71-81, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.018>. Acesso em 19 mar. 2017.

TASCIONE, V.; MOSCA, R.; RAGGI, A. Optimizing the environmental performance of integrated waste management scenarios by means of linear programming: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3086-3096, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.016>. Acesso em 15 mai. 2017.

TAYRA, F.; RIBEIRO, H. Modelos de Indicadores de Sustentabilidade: síntese e avaliação crítica das principais experiências. **Saúde e Sociedade**. v.15, n.1, p.84-95, jan-abr 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-12902006000100009>. Acesso em 25 abr. 2017.

TIXIER, P. *et al.* Modelling interaction networks for enhanced ecosystem services in agroecosystems. **Adv. Ecol. Res**, v. 49, p. 437-480, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-420002-9.00007-X>. Acesso em 19 mar. 2017.

TIXIER, P. *et al.* Food web-based simulation for agroecology. **Agronomy for sustainable development**, v. 33, n. 4, p. 663-670, 2013. Disponível em: [doi:10.1007/s13593-013-0139-8](https://doi.org/10.1007/s13593-013-0139-8). Acesso em 19 mar. 2017.

TOEWS, D.W. **Agroecosystem health: a framework for implementing sustainability in**

agriculture. In: WORLD COMISSION ON ENVIRONMENTAL DEVELOPMENT. *Our common future*. London: Oxford University Press, 1987.

TRANFIELD,D.;DENYER,D.;SMART,P.TowardsaMethodologyforDeveloping Evi-dence-InformedManagementKnowledgebyMeansofSystematicReview.**BritishJournalofManagemet**,v.14,n.3,p.207-222,2003.

VADREVU, K. P. *et al.* Case study of an integrated framework for quantifying agroecosystem health. **Ecosystems**, v. 11, n. 2, p. 283-306, 2008. Disponível em: [doi:10.1007/s10021-007-9122-z](https://doi.org/10.1007/s10021-007-9122-z). Acesso em 19 mar. 2017.

VAN BELLEN, H. M. Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005

VAN CAUWENBERGH, N. *et al.* SAFE—A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 120, n. 2, p. 229-242, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.09.006>. Acesso em 19 mar. 2017.

WAGENA, M. B. *et al.* Development of a nitrous oxide routine for the SWAT model to assess greenhouse gas emissions from agroecosystems. **Environmental Modelling & Software**, v. 89, p. 131-143, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.013>. Acesso em 19 mai. 2017.

WCED - World Comission on Environment and Development. **Our Commom Future**. Oxford and New York: Oxford University Press, 1987.

WEI, Y. *et al.* Balancing the economic, social and environmental dimensions of agro-ecosystems: An integrated modeling approach. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 131, n. 3, p. 263-273, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.021>. Acesso em 16 mai. 2017.

ZHANG, C.; GUO, P. An inexact CVaR two-stage mixed-integer linear programming approach for agricultural water management under uncertainty considering ecological water requirement. **Ecological Indicators**, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.018>. Acesso em 15 mai. 2017.

YUE, D. *et al.* Sustainable design and operation of cellulosic bioelectricity supply chain networks with life cycle economicenvironmental, and social optimization. **Ind. Eng. Chem. Res.**, vol. 53, p. 4008–4029, 2014. Disponível em:<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie403882v>. Acesso em 01 dez. 2016.

ANEXO A

Quadro 3 – Quadro de mando modelo

Dimensões	Indicadores	Índices	
		Agro T	Agro M
Ambiental	A1. Consumo de água irrigação		
	A2. Parâmetro da qualidade da água		
	A3. Consumo de energia		
	A4. Parâmetro da fertilidade do solo		
	A5. Manejo solo		
	A6. Erosão		
	A7. Uso de agroquímicos		
	A8. Disposição de embalagens vazias dos agroquímicos		
	A9. Área de reserva legal		
Econômica	Índice da dimensão ambiental		
	E1 – Produtividade		
	E2 – Confiança econômica		
	E3 – Comercialização		
	E4 – Ocorrência fitossanitária		
	E5 – Benefício/custo		
	E6 – Gestão e contabilidade		
Social	Índice da dimensão econômica		
	S1 – Emprego direto		
	S2 – Local de origem do trabalhador		
	S3 – Precariedade do trabalho		
	S4 – Uso de EPIs pelo trabalhador		
	S5 – Escolaridade: não sabem ler e escrever		
	S6 – Parâmetro de fator acidentário de prevenção		
Político-institucional	Índice da dimensão social		
	P1. Atividade intrageracional		
	P2. Participação instituições organizacionais		
	P3. Acesso à justiça trabalhista		
	P4. Acesso a assistência técnica		
	P5. Concessão ao crédito rural e isenção fiscal		
	P6. Transferências de tecnologia		
	P7. Logístico transporte e armazenagem		
	Índice da dimensão política-institucional		
	Índice de Desenvolvimento Sustentável (IDS) S³		

*UA1 unidade de análise 1 e **UA2 unidade de análise 2.

Elaboração: Reis (2013)