UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

MODELAGEM DINÂMICA TEMPORAL PARA A AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E SEUS EFEITOS NA SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA DA SUB-BACIA DO CÓRREGO DO BOI BRANCO - SP.

ALEXANDRA VAZ FERREIRA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP
Junho - 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

MODELAGEM DINÂMICA TEMPORAL PARA A AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E SEUS EFEITOS NA SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA DA SUB-BACIA DO CÓRREGO DO BOI BRANCO - SP.

ALEXANDRA VAZ FERREIRA

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román

Coorientadora: Drª. Alba Maria Guadalupe Orellana González

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP
Junho - 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO – SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Ferreira, Alexandra Vaz, 1985-
F383m Modelagem dinâmica temporal para a avaliação da disponibilidade hídrica e seus efeitos na sustentabilidade do sistema da sub-bacia do córrego do Boi Branco - SP / Alexandra Vaz Ferreira. – Botucatu : [s.n.], 2014
xi, 99 f. : tabs., ils. color., fots. color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Rodrigo Máximo Sánchez Román
Coorientador: Alba Maria Guadalupe Orellana González
Inclui bibliografia

1. Recursos hídricos. 2. Bacias hidrográficas – Brasil. 3. Água de irrigação. 4. Água na agricultura. I. Sánchez Román, Rodrigo Máximo. II. Orellana González, Alba Maria Guadalupe. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: **"MODELAGEM DINÂMICA TEMPORAL PARA A AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E SEUS EFEITOS NA SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA DA SUB-BACIA DO CÓRREGO DO BOI BRANCO-SP"**

ALUNA: ALEXANDRA VAZ FERREIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

Aprovado pela Comissão Examinadora

PROF. DR. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

PROFA. DRA. LESLIE IVANA SERINO CASTRO

Data da Realização: 13 de junho de 2014.

AGRADECIMENTOS

Uma das coisas primordiais da vida é saber ser grato pelas oportunidades. Diante disso, venho fazer meus sinceros agradecimentos.

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido a oportunidade de ter chegado até aqui, por ser meu apoio, a minha certeza e minha fortaleza.

Sou grata à minha família, em especial, ao meu pai: Antônio do Carmo Ferreira pelo amor, carinho, por ter me dado à formação pessoal e por acreditar em mim e nos meus sonhos, à Zildete Barroso Portugal e Dedivar de Souza Portugal por serem verdadeiros anjos na minha vida, pelo apoio incondicional e por tudo que fizeram e fazem por mim.

À Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP) e ao Departamento de Engenharia Rural, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román, pela disponibilidade e orientação.

À Drª. Alba Maria Guadalupe Orellana González, pela presteza sempre dispensada nos momentos em que foram solicitados esclarecimentos ou sugestões, sendo, minha coorientadora.

Agradeço ao corpo docente que com os seus ensinamentos não só acadêmicos, contribuíram para a minha formação profissional e também pessoal, por estarem disponíveis a ajudar a sanar as dúvidas sempre que necessário.

Agradeço em especial à Professora Drª. Célia Regina Lopes Zimback e aos seus orientados Donizete Nicolete e Juliano Boeck pela ajuda incondicional que me deram para o desenvolvimento de uma parte muito importante do meu trabalho.

À ASPIPP por disponibilizar algumas informações e ao sr. Abel Simões por ter me recebido na fazenda Olhos d'água e por ter fornecido dados a respeito do manejo da agricultura irrigada, o que foi de grande valia para o desenvolvimento do trabalho.

A todos os funcionários da biblioteca “Professor Paulo de Carvalho Mattos” pela atenção, dedicação, disponibilidade, profissionalismo, competência, educação e simpatia dispensada a mim e a todos os alunos, fazendo dessa um local agradável e aconchegante.

Agradeço também aos funcionários Dejair Ribeiro, Márcya Almeida, Gisele Pinheiro e a Débora Branco pela disponibilidade atenção, amizade e presteza.

Aos amigos Natália Soares, Edilson Ramos e Ramilos Brito pelo apoio, parceria e socorro nas horas difíceis.

Às pessoas com quem moro e morei durante esse período Thaís Zarili, Dariane Franco, Laila Brito e Francienne Gois; por terem sido minha família aqui em Botucatu e pelos bons momentos passados juntos. Enfim, agradeço a todos que contribuíram para a realização desse trabalho e por mais essa conquista na minha vida.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS.....VII
LISTA DE TABELAS.....IX
LISTA DE EQUAÇÕES.....X
LISTA DE ABREVIATURAS..... XI
1.RESUMO.....1
2.SUMMARY.....3
3. INTRODUÇÃO.....5
3.2 OBJETIVOS.....7
3.2.1 Objetivo Geral.....7
3.2.2 Objetivos Específicos.....7
4. REVISAO BIBLIOGRÁFICA.....9
4.1 Desenvolvimento Sustentável e Recursos Hídricos.....9
4.1.2 Recursos Hídricos.....11
4.2 Agricultura Sustentável.....13
4.3 Sustentabilidade e Enfoque Sistêmico.....15
4.4 Dinâmica de Sistemas: Simulação e Análise.....17
4.5 Diagrama causal.....18
4.6 Diagrama de Fluxos e Estoques.....19
5. MATERIAL E MÉTODOS.....21
5.1 Caracterização da Região de Estudo.....21
5.2 Aspectos Gerais do Córrego Boi Branco.....26
5.3 Delimitação da Área.....28
5.4 Características morfológicas.....29
5.5 Características de uso e ocupação do solo.....32
5.6 Características geológicas pedológicas.....36
5.7 Características pluviométricas.....38
5.8 Demanda de água dos diversos setores.....43
5.9 Dinâmica de Sistemas.....44

5.9.1 Desenvolvimento de um Modelo em Dinâmica de Sistemas.....44
5.9.2 Construção de modelos em Dinâmica de Sistemas 45
5.9.3 Diagrama Causal do Modelo (Etapa de conceitualização) 46
5.9.4 Diagrama de Estoque e Fluxo (Etapa de formalização).....47
5.9.5 Descrição Matemática do modelo.....49
5.9.6 Construção dos Cenários 55
6. RESULTADOS E DISCUSÃO 56
6.1 Características morfológicas.....56
6.2 Características de uso e ocupação do solo 59
6.3 Pluviometria.....61
6.4 Validação do modelo (Etapa de exploração) 66
6.5 Resultados das Simulações 68
6.5.1 Cenário 1: Efeitos das variáveis precipitação com probabilidade de ocorrência de (i) 75% e (ii) 50% e interação com eficiência do sistema de irrigação de (a) 70%, (b) 75%, (c) 80%, (d) 85% e (e) 90% na disponibilidade dos recursos hídricos e no índice de sustentabilidade para a sub-bacia do Boi Branco de 2011 a 2021. 69
6.5.2 Cenário 2: Efeito da precipitação com probabilidade de ocorrência de (i) 75% e (ii) 50% e da vazão ecológica de (f) 1/40 e (g) 1/10 na disponibilidade do recurso hídrico e no índice de sustentabilidade para a sub-bacia do Boi Branco de 2011 a 2021. 73
6.5.3 Cenário 3: Simulação do comportamento do recurso hídrico e do índice de sustentabilidade considerando o comportamento da precipitação para o período de 2011 a 2021 igual ao da série de 1971 a 1980. 77
7. CONCLUSÕES 83
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85
9. APÊNDICE.....98

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 - Diagrama de Enlace Causal. 19
Figura 2- Componentes utilizados em diagramas de Fluxos e Estoques. 20
Figura 3- Localização da UGRHI 14 no estado de São Paulo. 22
Figura 4 - Mapa dos Municípios que compõem a área da UGHRI-14. 23
Figura 5 - Localização da sub-bacia do Córrego do Boi Branco nos municípios de Itaí e Paranapanema. 26
Figura 6 - Área da Sub-bacia do Córrego do Boi Branco.....27
Figura 7- Área da Sub-Bacia do Córrego do Boi Branco com caracterização topográfica e rede de drenagem. 29
Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do solo. 32
Figura 9 - Foto da área de vegetação ciliar na sub-bacia do córrego Boi Branco. 33
Figura 10- Área cultivada pela cultura do feijão (Phaseolus sp.) e irrigada por pivô central na sub-bacia do córrego Boi Branco. 34
Figura 11 - Vista de um açude na sub-bacia do córrego Boi Branco. 35
Figura 12 - Predomínio de Pastagem/Campo antrópico. 36
Figura 13 - Ilustração do Polígono de Thiessen utilizando o software Quantum Gis 1.8 para determinar a pluviosidade média anual na área da sub-bacia do córrego do Boi Branco. 41
Figura 14 - Diagrama Causal do modelo para a sub-bacia do córrego Boi Branco. 46
Figura 15 - Diagrama de Estoque e Fluxo do MRH-BB. 48
Figura 16 - Cenário precipitação x eficiência do sistema de irrigação. 55
Figura 17 - Cenário precipitação x vazão ambiental. 55
Figura 18 – Classificação dos cursos de água da rede de drenagem segundo Strahler. 58
Figura 19 - Gráfico da Curva de Dupla Massa para análise de consistência dos dados. 63
Figura 20 - Gráfico da precipitação média mensal para a área da sub-bacia do Boi Branco. .64
Figura 21 - Crescimento populacional para a área da sub-bacia do córrego do Boi Branco para o período de 2011 a 2021 calculado pelo modelo no programa Stella e pelo programa Excel.67

Figura 22 - Demanda total de água para precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função das eficiências do sistema de irrigação. 69
Figura 23 - Demanda agrícola para precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função das eficiências do sistema de irrigação. 70
Figura 24 – Índice de Sustentabilidade global projetado para o período de 2011 a 2021. 71
Figura 25 – Índice de Sustentabilidade para águas superficiais projetado de 2011 a 2021.....72
Figura 26 - Demanda total de água para precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função da vazão ambiental de 1/40 e 1/10. 73
Figura 27 - Demanda agrícola para precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função da vazão ambiental de 1/40 e 1/10. 74
Figura 28 – Índice de Sustentabilidade global para vazão ambiental de 1/40 e 1/10 projetado para o período de 2011 a 2021. 75
Figura 29 – Índice de Sustentabilidade para águas superficiais para vazão ambiental de 1/40 e 1/10 projetado de 2011 a 2021.....76
Figura 30 - Oferta total e demanda total e água.....77
Figura 31 - Oferta de água superficial e demanda total.....78
Figura 32 – Índice de Sustentabilidade global e Índice de Sustentabilidade para água superficial. 79

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1- Sub-bacias e municípios da UGRHI-14 24
Tabela 2- Uso e ocupação do solo. 36
Tabela 3 - Geologia na sub-bacia do córrego do Boi Branco: proporção de ocorrência das rochas. 37
Tabela 4 - Pluviosidade média total anual nos postos (mm). 38
Tabela 5 - Evapotranspiração Potencial mensal em (mm) para a área da sub-bacia do córrego Boi Branco. 43
Tabela 6 - Dados utilizados como entrada no modelo de estoque e fluxo. 54
Tabela 7 - Características físicas da sub-bacia do córrego do Boi Branco. 56
Tabela 8 - Pluviosidade média total anual nos postos (mm). 61
Tabela 9 - Precipitação média na área da Sub-Bacia. 64
Tabela 10 - Precipitação para os níveis de probabilidade de ocorrência para a área da sub-bacia do Boi Branco. 65
Tabela 11 – Cenários propostos e avaliados para a sub-bacia do córrego Boi Branco. 68
Tabela 12 – Resultados das simulações dos cenários 1 e 2 para a sub-bacia do córrego Boi Branco de 2011 a 2021. 81
Tabela 13- Resultados da simulação do cenário 3 para a sub-bacia do córrego Boi Branco de 2011 a 2021. 82

LISTA DE EQUAÇÕES

Página

Equação 1- Coeficiente de compacidade.....30
Equação 2- Coeficiente de Forma.....31
Equação 3- Índice de circularidade.....31
Equação 4- Densidade de drenagem.....32
Equação 5- Preenchimento das falhas pluviométricas.....40
Equação 6- precipitação média.....41
Equação 7- distribuição de frequência acumulada.....42
Equação 8- Evapotranspiração Potencial.....42
Equação 9- Oferta total d'água.....49
Equação 10- Demanda total deágua.....50
Equação 11- Demanda agrícola.....50
Equação 12- Consumo Rural.....51
Equação 13- População rural.....51
Equação 14- Índice de Sustentabilidade.....52

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA - Agencia Nacional de Águas.

APP – Área de Preservação Permanente.

ASPIPP – Associação dos Produtores Irrigantes e Plantio na Palha.

CMMA - Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento.

DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica.

DS - Dinâmica de Sistemas.

FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação.

FEHIDRO - Fundo Estadual de Recursos Hídricos.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IS – Índice de Sustentabilidade.

MRH-BB – Modelo do Recurso Hídrico do Boi Branco

ONU – Organização das Nações Unidas.

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos.

UGRHI- Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

UNESCO- Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura.

SIG- Sistema de Informação Geográfica.

1. RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi formular um modelo para analisar a sustentabilidade hídrica da sub-bacia do córrego do Boi Branco utilizando a metodologia de Dinâmica de Sistemas (DS). A DS é uma ferramenta que permite representar o comportamento de sistemas complexos incluindo as relações de causa e efeito e os enlaces de retroalimentação utilizando um computador para simular modelos matemáticos tornando possível controlar e explorar um sistema real. A sub-bacia do córrego do Boi Branco abrange 80,71 km^2 de área de drenagem; sua vertente direita situa-se no sudoeste do município de Paranapanema e a esquerda no sudeste do município de Itaí, entre as Longitudes 48º48'39'' e 48º55'39'' e Latitudes 23º36'01'' e 23º29'00''. Da área total da sub-bacia, 20,09 km^2 são irrigados por pivô central e as principais culturas cultivadas são: trigo, algodão, milho, feijão, batata e soja. As simulações para determinar a oferta, a demanda de água e o índice de sustentabilidade foram feitas considerando-se três cenários: Efeitos das precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função da eficiência do sistema de irrigação e depois, em função da vazão ecológica de 1/40 e 1/10, para os dois primeiros cenários e para o último cenário, o comportamento da precipitação igual aos 10 primeiros anos da série de 1971 a 1980 na disponibilidade de água e no índice de sustentabilidade para a sub-bacia do Boi Branco. Os resultados evidenciam que a demanda hídrica é maior que a oferta potencial de água superficial, refletindo assim, condições de vulnerabilidade, permitindo ao DAEE classificá-la como crítica de acordo com o artigo 14 da Lei 9.034. Conclui-se que 1) Considerando-se apenas a oferta de água superficial na sub-bacia, e a atividade agrícola irrigada, o recurso hídrico não é sustentável em nenhum dos cenários; 2) a sustentabilidade na

sub-bacia do córrego do Boi Branco só será possível, sem depender dos fatores climáticos se os agricultores passarem a explorar as águas subterrâneas para complementar a captação superficial; 3) a eficiência do sistema de irrigação igual ou superior a 80% diminui a demanda de água; 4) a vazão ecológica de 1/40 poderia ser utilizada como base para o processo de gestão, tendo em vista o uso múltiplo das águas enquanto não houver legislação pertinente.

Palavras chave: Dinâmica de sistemas, Modelos Dinâmicos, Recursos hídricos, Irrigação por pivô central.

TEMPORAL DYNAMIC MODELING FOR THE ASSESSMENT OF WATER AVAILABILITY AND ITS EFFECTS ON SUSTAINABILITY OF THE WATER RESOURCES AT BOI BRANCO SUB-BASIN. Botucatu, 2014. 113 p.
Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.
Authora: ALEXANDRA VAZ FERREIRA
Adviser: RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

2. SUMMARY

This study aimed to formulate a model in order to analyze the water resources sustainability at Boi Branco sub-basin using System Dynamics (SD) methodology. The SD allows to represent the behavior of complex systems including relation between cause and effect, and through feedback linkages mathematical computational simulation models allowing to control and tap a real system. The Boi Branco sub-basin has a drainage area of 80.71 km^2; its right arm is located in the southeast city of Paranapanema and its left arm in the southeast city of Itai; between longitudes 48º48'39" and 48º 55'39" and latitudes 23º36'01" and 23º29'00", respectively. 20.09 km^2 of the sub-basin is irrigated by center pivot and, cultivated with wheat, cotton, corn, beans, potatoes and soybeans. Simulations to determine the supply, demand and water sustainability index can be grouped in three scenarios: effects of precipitation with a probability of 75% and 50% and the efficiency of the irrigation system, and considering an ecological flow of 1/40 and 1/10 for the first two scenarios and for the latter scenario, the behavior of rainfall equal to the first 10 years of the series from 1971 to 1980. The results show that water demand is greater than the potential supply of surface water; it reflects vulnerable conditions which classify it as critical, in accordance to Article 14 of Law 9034. It is concluded: 1) Considering only the surface water supply in the sub-basin and irrigated agriculture, water resources are not sustainable in all scenarios; 2) The sustainability of water resources in Boi Branco sub-basin, excluding weather factors will only be possible if farmers include groundwater resources to supplement surface uptake; 3) The efficiency of

irrigation systems equal to or greater than 80% reduces water demand; 4) The instream flow 1/40 could be used as a basis for process management, in view of the multiple use of water.

Keywords : Dynamic Systems , Dynamic Models , Water Resources , Irrigation Center Pivot .

3. INTRODUÇÃO

A explosão demográfica que ascendeu durante a Revolução Industrial em meados do século XVIII fez com que a humanidade chegasse a um patamar de crescimento populacional que nunca existiu antes, pois com o desenvolvimento econômico, os indivíduos, em média, passaram a viver mais e melhor. Dessa maneira, o padrão de consumo da humanidade disparou, chegando a um nível de produção e consumo ambientalmente insustentável.

A grande demanda pelos recursos naturais causa um efeito devastador ao meio ambiente, uma vez que continuamente em nome do desenvolvimento e da economia, destroem-se florestas, rios, e a fauna, além, da poluição do ar, e do solo, seja com produtos tóxicos, seja com a deposição de resíduos sólidos. A demanda por recursos hídricos, em particular, é de grande valia, pois depende-se de água para efetuar-se as atividades que são primordiais para a vida. Necessitamos de água para beber, produzir e preparar os alimentos, limpeza, transporte e produção de energia, sendo assim, um insumo para inúmeras atividades econômicas além de ser suporte vital para a vasta biodiversidade do planeta.

Segundo Reichardt (1978), a água é fator fundamental na produção vegetal. Sua falta ou seu excesso afetam de maneira decisiva o desenvolvimento das plantas e, devido a isto, seu manejo racional é um imperativo fundamental na maximização da produção agrícola.

Para a Organização das Nações Unidas - ONU (2013), não há dúvida de que uma das relações mais importantes é a que existe entre água e a produção de alimentos, haja vista, que tudo o que nós comemos requer água para crescer. Porém, as pessoas raramente pensam sobre a água e outros recursos naturais que são necessários para produzi-los. Poucos

estão cientes que são necessários cerca de 3 mil litros de água para produzir alimentos para apenas uma pessoa consumir diariamente, contudo, um estudo divulgado por essa mesma instituição no ano 2000 previu que 2,7 bilhões de seres humanos, 45% da população mundial, ficarão sem água no ano 2025 (ANGÊLO et al., 2000).

A escassez de água é uma condição associada a milhões de mortes causadas por doença ao ano, má nutrição e fome crônica (ARAIA, 2009). A escassez de água no mundo agrava-se, principalmente, em virtude da falta de manejo e da ausência de usos sustentáveis dos recursos naturais.

De acordo com os padrões internacionais, a água é considerada escassa quando se dispõe de menos de 1000 $m^3 habitante^{-1} ano^{-1}$ e o Brasil disponibiliza em média 38 mil m^3 de água per capita ano^{-1} (REBOUÇAS, 1997 apud. MENEZES, 2007). Percebe-se então que o Brasil tem uma situação favorável, em termos globais, quanto aos recursos hídricos. Entretanto, apesar desse aparente conforto, existe uma distribuição espacial desigual dos recursos hídricos no território brasileiro. Cerca de 80% de sua disponibilidade hídrica estão concentrados na região Amazônica onde tem-se o menor número de habitantes (ANA, 2012).

Dentre os diversos usos dos recursos hídricos, a irrigação destaca-se pela importância socioeconômica em regiões agrícolas áridas e semiáridas, onde é praticada para suplementar a precipitação natural no atendimento das necessidades hídricas das culturas (FARIAS et al., 2000). De acordo com (CHRISTOFIDIS, 1997; FAO, 2002 apud. AMORIM et al., 2008), cerca de 70% de toda água de boa qualidade disponível no planeta é utilizada pelo setor agrícola, causando desta forma, um grande impacto na disponibilidade desse recurso natural.

O documento final da Rio +20 “O futuro que queremos”, publicado em Julho 2012, reconhece que a água está no centro do desenvolvimento sustentável porque está intimamente ligada a uma série de desafios globais importantes, como: à segurança alimentar e energética , à saúde humana , às alterações climáticas , aos desastres naturais e à integridade dos ecossistemas (ONU, 2013). Desta forma, faz-se necessário trabalhar em conjunto em todos os setores, evitando-se assim, que algum seja priorizado, para não causar prejuízos aos outros e colocar em perigo à sustentabilidade.

Diante do exposto, fica claro que as atividades humanas, no que dizem respeito ao crescimento industrial, agrícola e urbanização nas últimas décadas vêm causando, um grande impacto negativo nos recursos hídricos do planeta haja vista, a degradação ambiental em todas as escalas decorrerem da superexploração dos recursos naturais.

Pode-se concluir que o problema da água é extremamente complexo. São muitas as perspectivas, interesses, percepções e alternativas de uso dos recursos hídricos, dada às diversidades de agentes, posições, rendas, prioridades e localizações. Faz-se necessário então criar ferramentas de tomada de decisão nas estruturas de gerenciamento dos recursos hídricos para garantir o uso sustentável da água, objetivando estabelecer um sistema de deveres e direitos de uso desse recurso, a fim de evidenciar seu valor econômico e, assim, estimular seu uso racional e promover a responsabilidade dos usuários (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2009).

3.2 OBJETIVOS

3.2.1 Objetivo Geral

Formular um modelo utilizando a metodologia de Dinâmica de Sistemas para analisar a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos da sub-bacia do córrego do Boi Branco.

3.2.2 Objetivos Específicos

Desenvolver um processo de modelagem em Dinâmica de Sistemas (DS) aplicados aos recursos hídricos, mediante a construção de diagramas de influência, de estoques e fluxos.

Elaborar e validar um modelo matemático representativo da oferta e demanda de água, para a área de abrangência da sub-bacia do córrego Boi Branco.

Simular o comportamento do sistema hídrico sob diferentes cenários, tais como: a) influência do fator de variabilidade climática sobre a oferta e a demanda de água da sub-bacia; b) influência da eficiência dos sistemas de irrigação na quantidade de água

demandada do recurso hídrico; c) mostrar a importância e/ou a influência da vazão ambiental (ecológica) sobre a demanda dos recursos hídricos.

4. REVISAO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Desenvolvimento Sustentável e Recursos Hídricos

O assunto “desenvolvimento sustentável” surgiu a partir de estudos da ONU sobre as mudanças climáticas, como uma resposta para a humanidade perante a crise social e ambiental pela qual o mundo passava a partir da segunda metade do século XX. Estes estudos foram liderados pela Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CMMAD), também conhecida como Comissão de Brundtland, presidida na época pela norueguesa Gro Haalen Brundtland (BARBOSA, 2008; LAYRARGUES, 1997).

Durante o processo preparatório à Conferência das Nações Unidas (Rio 92) foi desenvolvido um relatório que ficou conhecido como “Nosso Futuro Comum”. Tal relatório contém informações colhidas pela comissão ao longo de três anos de pesquisa e análise, sobre as questões sociais, principalmente no que se refere ao uso da terra, sua ocupação, suprimento de água, abrigo e serviços sociais, educativos e sanitários, além de administração do crescimento urbano (BARBOSA, 2008).

O destaque do Relatório da Rio 92 é sem dúvida a elaboração de um novo conceito de desenvolvimento sustentável. Este novo conceito apresenta limites não absolutamente estabelecidos pelo nível de desenvolvimento tecnológico e social, mas particularmente no que diz respeito aos recursos ambientais e pela capacidade da natureza de absorver os efeitos das atividades antrópicas (LAYRARGUES, 1997).

O início da década de noventa foi marcado pelo crescente enfoque sobre a necessidade de maior cuidado com a preservação dos recursos naturais do planeta visando reduzir a degradação ambiental, propondo o desenvolvimento socioeconômico com a conservação e proteção do meio ambiente (desenvolvimento sustentável).

Desenvolvimento sustentável é o conceito que leva em consideração o desenvolvimento (crescimento) econômico respeitando a sustentabilidade social e ecológica. É um desenvolvimento economicamente viável (rentável), social e ecologicamente sustentável; a fim de suprir as necessidades das gerações do presente sem comprometer a sobrevivência das futuras gerações (CMMAD, 1988).

Para Ribeiro (2001), o desenvolvimento sustentável tornou-se um discurso poderoso, promovido por organizações internacionais, empresários e políticos, repercutindo na sociedade civil internacional e na ordem ambiental internacional, entretanto, para alguns autores, como Layrargues esse é um assunto controverso ainda.

> *"[...] para haver um desenvolvimento sustentável é preciso atender às necessidades básicas de todos e dar a todos a oportunidade de realizar suas aspirações de uma vida melhor. Um mundo onde a pobreza é endêmica estará sempre sujeito a catástrofes ecológicas ou de outra natureza"* (LAYRARGUES, 1997).

De acordo com Acselrad (2004), a sustentabilidade remete a relações entre a sociedade e a base material de sua reprodução. Portanto, não trata-se de uma sustentabilidade dos recursos e do meio ambiente, mas sim das formas sociais de apropriação e uso desses recursos e deste ambiente.

> *"[...] há a ideia de dar preço ao que não tem preço: internalizam-se custos e procura-se considerar a natureza como capital. Instaura-se uma tentativa de redefinir o que situa-se sob o mercado e o que permanece fora dele. Essa é a lógica da chamada modernização ecológica, que estaria privilegiando a esfera econômica em relação à política: traduz-se o meio ambiente em economia para não explicitar o que de conflito político ele encerra"* (ACSELRAD, 2004).

A utilização dos recursos hídricos é um fator limitante (crucial) para o desenvolvimento sustentável tanto quantitativa quanto qualitativamente haja vista, que a má utilização da água, a poluição e a degradação dos corpos hídricos ainda são os grandes entraves, pois, a água tem um papel integrador e quando a sua qualidade e quantidade são comprometidas, há grandes perdas.

O conceito de uso eficiente da água inclui qualquer medida que reduza a quantidade que se utiliza por unidade de qualquer atividade, e que favoreça a manutenção e a melhoria da qualidade da água (PAZ et al., 2000). A água não é somente um recurso crítico em termos de segurança humana e ambiental, mas oferece também grandes oportunidades para novos avanços em termos de desenvolvimento sustentável (GEO BRASIL, 2007).

4.1.2 Recursos Hídricos

Essencial à vida, e imprescindível às diversas atividades humanas, a água constitui-se numa das substâncias mais importantes, tanto para os processos físico-químicos quanto para o equilíbrio da ecologia ambiental; porém, só recentemente vem sendo considerada um recurso natural passível de ser esgotado (AMORIM, 2008; REICHARDT, 2012).

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), os recursos hídricos são bens de domínio público escassos, cuja gestão deve ser conduzida de forma integrada, participativa e articulada entre os diversos órgãos gestores e setores usuários, para que sejam asseguradas condições quantitativas e qualitativas adequadas de fornecimento de água para as atuais e futuras gerações (ANA, 2004).

O problema da escassez da água levanta a questão da sobrevivência da vida sobre o planeta. Especificamente pode trazer impacto imediato sobre a economia, ameaçando sua estabilidade e até mesmo a sua manutenção. Certamente a questão da escassez da água tem importância nos vários âmbitos, mundial, nacional, regional e local (GOULART JUNIOR et al., 2011).

A crise de água não é consequência apenas de fatores climáticos e geográficos, mas principalmente do uso irracional dos recursos hídricos. Entre as causas do problema figuram: o fato de a água não ser tratada como um bem estratégico no país, a falta de integração entre a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e as demais políticas públicas, os graves problemas na área de saneamento básico e a forma como a água doce é compreendida, visto que muitos a consideram um recurso infinito (SILVA, 2012).

Segundo a Agencia Nacional de Águas (ANA, 2013), a questão da segurança hídrica está associada à garantia da oferta de água para o abastecimento humano e para as atividades produtivas, de forma que se possam enfrentar as secas e estiagens ou qualquer desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água que signifique restrição ao consumo e, consequentemente, ao desenvolvimento econômico e regional.

Os recursos hídricos podem ser usados de maneira mais eficiente através da combinação de uma nova tecnologia com aquela já existente, obtenção de melhores informações, uso mais sensato, adotando-se novas técnicas agrícolas e de irrigação que possam contribuir para a redução do consumo de água até alcançar níveis sustentáveis (BANCO MUNDIAL, 2010).

Segundo Bernardo et al. (2006), a irrigação não deve ser considerada isoladamente, mas sim como parte de um conjunto de técnicas utilizadas para garantir a produção econômica de uma determinada cultura, com adequado manejo dos recursos naturais. Todavia, o crescimento sustentável da irrigação necessita de um programa muito bem elaborado de pesquisa e desenvolvimento para o seu estabelecimento e consolidação, a fim de que, o futuro da irrigação envolva produtividade e rentabilidade com eficiência no uso da água, de energia, de insumos e respeito ao meio ambiente.

De acordo com o Banco Mundial (2010), a humanidade precisará equilibrar o aumento de produção com a proteção dos seus recursos naturais; o que significa gerir a água, o solo, as florestas e a biodiversidade de maneira mais eficiente, com a finalidade de obter os produtos e serviços necessários à sociedade sem comprometer ainda mais o meio ambiente por seu uso excessivo, poluição ou ocupações de áreas indevidas.

Fica claro que uma melhor gestão dos recursos hídricos é de suma importância para que a agricultura adapte- se a esse novo cenário.

Os recursos hídricos precisarão ser usados de forma mais eficiente, para isso, os gestores precisarão pensar em grande escala e criar formas flexíveis e eficientes de alocar estes recursos para atender as demandas competitivas de quantidade de água para o consumo humano como, energia, agricultura, pesca e consumo urbano assim como, para ecossistemas saudáveis, tais como: florestas, alagados e oceanos (BANCO MUNDIAL, 2010).

A gestão da água mostra-se fundamental diante de toda a problemática que traz a sua escassez. Portanto, estudos que possam trazer informações sobre essa

problemática e sobre as perspectivas futuras diante dos fatos e cenários de uso da água poderão subsidiar tomadas de decisão em termos de formação de políticas de intervenção e de gestão desse bem (GOULART JUNIOR et al., 2011).

4.2 Agricultura Sustentável

Agricultura sustentável significa coisas diferentes para pessoas diferentes. Para os mais preocupados com os aspectos econômicos, agricultura sustentável é sinônimo da manutenção da produção e do lucro de sistemas físicos; se possível com baixo uso de insumos externos. Para ecologistas, refere-se ao uso equilibrado de recursos renováveis e não renováveis e à diminuição da degradação ambiental e para os sociólogos, não é puramente um problema de produção e produtividade física, mas um modo de vida, para muitas pessoas e a manutenção de comunidades rurais estáveis (PINHEIRO, 2000).

Embora o setor agrícola continue a ser um dos principais utilizadores de terra e água, terá que buscar novas formas de preservar esses recursos para manter a sua viabilidade, e para minimizar os impactos negativos sobre os ecossistemas e o bem-estar humano (FAO, 2013).

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) prevê que a demanda de alimentos vai aumentar em 60% até 2050 enquanto a disponibilidade de água para a agricultura já é incerto em muitas regiões do mundo, como por exemplo, África, Índia e China (ONU, 2013).

Garantir comida e água suficiente para todos e alcançar o desenvolvimento sustentável, depende da adoção de novas práticas para a gestão responsável dos recursos naturais, pois, somente dessa maneira será possível chegar a um princípio de agricultura sustentável (FAO, 2013). Porém, como continuar produzindo em quantidade e qualidade sem causar tantos danos ao meio ambiente?

A sustentabilidade da agricultura é um assunto bastante complexo, pois, representa um dos grandes desafios para a população mundial, pois, se de um lado precisa-se produzir mais alimentos para atender o crescimento populacional, que segundo estimativas da ONU (2013), em 2050 atingirá aproximadamente 9,2 bilhões de habitantes; do

outro, necessita-se levar em consideração a proteção e/ou conservação do meio ambiente, praticando uma agricultura que seja capaz de usar e conservar a biodiversidade e que não degrade tanto a qualidade do solo e dos recursos hídricos.

Para Costa (2010), a qualificação da agricultura como "sustentável" denota insatisfação com a sua atual situação e a procura por um novo padrão de produção que não agrida o ambiente, mantendo-se as características dos sistemas agrários. A agricultura sustentável tem de compatibilizar as suas funções de produção de bens materiais, alimentos e matérias-primas (função produtiva) e de serviços (função social) com os sistemas com os quais estão vinculadas de maneira direta, isto é, o ambiente, a sociedade e a economia.

> *"Uma agricultura sustentável é aquela que faz o balanço equilibrado entre interesses ambientais, viabilidade econômica e justiça social entre todos os setores da sociedade" (*ALLEN et al., 1991 apud COSTA, 2010 *)*

De acordo com Lopes (2007) e Kamiyama (2011), para se garantir a sustentabilidade futura da atividade produtiva será necessário que se invista em conhecimento científico e tecnológico que permita desenvolver sistemas de produção inovadores, voltados para o aumento da produtividade dos recursos naturais e serviços ambientais utilizados pelo agronegócio.

A grande pressão da agricultura sobre o meio ambiente indica que é preciso buscar um novo patamar produtivo, o qual seja capaz de fazer uso de forma mais eficiente dos recursos naturais; respeitando o meio ambiente, preocupando-se com a manutenção da capacidade produtiva de produtos com qualidade e saudáveis em longo prazo, além de, considerar os danos causados pela prática da agricultura convencional.

Para Masera et al. (2001); CCE, (2001); Navarro (2002) e Hãni (2007) apud Costa (2010), a agricultura sustentável tem que ser capaz de não degradar o ambiente, tem que ser tecnicamente adequada, economicamente viável e socialmente aceitável. Precisa levar em consideração a fragilidade ambiental e visar à produção em harmonia com a natureza.

4.3 Sustentabilidade e Enfoque Sistêmico

O pensamento sistêmico surgiu com o declínio do Fordismo. Esse pensamento tem como objetivo compreender um todo de uma forma mais clara para procurar as influências das partes entre si. Um sistema não pode ser analisado apenas pelas partes que o integram, porém, é indispensável à relação entre essas partes, contextualizando-as para entender o funcionamento de um todo, compondo assim, um fenômeno maior (SILVA et al., 2011).

O enfoque sistêmico é uma ferramenta que propõe estudos interdisciplinares, que sejam capazes de analisar a realidade de ângulos diversos e complementares, além disso, é capaz de articular (ligar) coerentemente diferentes metodologias e olhares utilizando diferentes ciências para alcançar conclusões científicas no desenvolvimento de soluções para a realidade.

Para Doretto (1998), a abordagem pelo enfoque sistêmico preconiza que, a partir de uma visão ampla dos entraves e das potencialidades dos sistemas de produção, é possível efetuar a leitura da realidade e do processo de gestão dos meios de produção que condicionam a organização da produção nas unidades produtivas.

Do enfoque sistêmico extrai-se a ideia de que a organização é um sistema composto de elementos ou componentes interdependentes. A organização revela-se como um conjunto de pelo menos dois sistemas que se influenciam mutuamente: sistema técnico, que compreende os recursos e componentes físicos e abstratos que até certo ponto independem das pessoas e sistemas sociais, que são todas as manifestações do comportamento dos indivíduos e dos grupos (BEER, 1985 apud LIBONI; CEZARINO, 2012).

Kim (1998) apud Sannino (2006) apresentou o pensamento sistêmico como a forma de ver e falar sobre a realidade que nos auxilia a entender e trabalhar melhor com sistemas para influenciar a qualidade de nossas vidas. Assim, o Pensamento Sistêmico é a capacidade de se conhecer o ambiente enquanto um todo e conseguir prever as consequências de uma ação com base no encadeamento e nas dependências existentes. Uma forma holística de pensar que contribui para a compreensão de sistemas complexos e que quando utilizado em

aplicações no mundo real ajuda a promover a eficiência da gestão, descrevendo e apresentando formalmente os sistemas.

Segundo Vasconcellos (2008), o pensamento sistêmico é uma nova visão do mundo, uma nova forma cientifica de ver e pensar os acontecimentos no mundo, que terá consequências fundamentais para as práticas científicas, para as práticas cotidianas e para os relacionamentos.

De acordo com Pinheiro (2000), a evolução na direção da visão sistêmica tem acontecido em várias áreas da ciência, como por exemplo, na Física, na Biologia, na Comunicação, na Informática, na Medicina, na Psicologia, na Cibernética, na Eletrônica e inclusive na Agricultura.

Na agricultura, a abordagem de sistemas emergiu numa era "pós-revolução verde", em decorrência das crescentes criticas e fracassos das ações de desenvolvimento rural convencionais. Foi apresentada como uma alternativa, sobretudo para os produtores familiares e de recursos físicos e financeiros escassos, tradicionalmente marginalizados e a beira do processo de exclusão social (PINHEIRO, 1997).

> *"Na agricultura, o enfoque sistêmico tem se tornado cada vez mais necessário, devido à crescente complexidade de sistemas organizados e manejados pelo homem e da emergência do conceito de sustentabilidade"* (PINHEIRO, 2000).

Portanto, o Enfoque Sistêmico propõe uma interação e uma interdependência entre os vários setores que compõe um sistema, isto é, a mudança de um elemento, influencia na mudança de outros (*feed back*). O conhecimento do Enfoque Sistêmico permite uma ampla compreensão dos sistemas, com o melhor entendimento de como as partes se relacionam e como o sistema evolui (LIBONI; CEZARINO, 2012).

4.4 Dinâmica de Sistemas: Simulação e Análise

A Dinâmica de Sistemas (DS) foi proposta e desenvolvida na década de 50 pelo engenheiro eletricista Jay Forrester na Escola de Administração Sloan School of Management do MIT (Massachusets Institute of Technology). O pesquisador utilizou técnicas de ciências e engenharia, para analisar a utilização de sistemas de realimentação em processos administrativos, com o intuito de investigar os motivos dos fracassos de corporações (SANNINO, 2006).

Desde então, este campo tem se expandido passando a contemplar pesquisadores e praticantes das mais diversas áreas do conhecimento, como a medicina, economia, sociologia, ecologia, educação, além do domínio dos negócios suportando desde soluções em problemas de gestão empresarial e econômica, indo até ecologia e fenômenos sociais (FERNANDES, 2001 apud MEDEIROS JÚNIOR et al., 2006).

O conceito central para Dinâmica de Sistemas está em entender como os objetos de um sistema interagem entre si, pois tanto os objetos quanto as pessoas em um sistema interagem através de laços de realimentação, onde uma mudança em uma variável afeta outras variáveis. Com o passar do tempo, essas modificações por sua vez alteram a variável original e, assim, consecutivamente (SDEP, 2005 apud SANNINO, 2006).

Dinâmica de Sistemas é uma metodologia que permite ir além dos estudos de casos e das teorias descritivas. Ela não se restringe só a sistemas lineares, porém, pode fazer pleno uso das características não lineares dos sistemas. Em conjunto com a computação, os modelos de DS permitem uma simulação eficaz de sistemas complexos. Essa metodologia não tem a função de retratar a realidade, mas sim, aproximar-se a ela fazendo com que os modelos construídos e simulados sejam equivalentes ao mundo real (ORELLANA-GONZÁLEZ, 2006).

É uma metodologia que busca mapear sistemas organizacionais ou sociais, procurando examinar a inter-relação de suas influências, vendo-as num contexto sistêmico e entendendo-as como parte de um processo comum. Por intermédio da simulação, propõe a compreensão de como o sistema em foco evolui no tempo e como mudanças em suas

partes afetam todo o seu comportamento (ANDRADE, 1997 apud MEDEIROS JÚNIOR et al., 2006).

As ferramentas utilizadas para fazer modelagem sistêmica, permitem a elaboração de "cenários", os quais são considerados fundamentais para a formulação de políticas e para a análise de resultados. Após a apresentação dos resultados dos cenários simulados, especialistas e sociedade civil podem juntamente decidir sobre aquele que melhor se ajusta as exigências ecológicas, econômicas e sociais.

A Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*) é antes de tudo uma linguagem que permite expressar mais adequadamente as cadeias de eventos circulares (loops) existentes na natureza. Através de diversos tipos de diagramas (causais; estoque e fluxo) é possível expressar graficamente um sistema, como por exemplo, um pedaço bem delimitado da natureza possibilitando ver mais claramente, a complexidade dinâmica das relações entre as partes do mesmo ao longo do tempo (VILLELA, 2005).

4.5 Diagrama causal

Os modelos causais são diagramas que servem para descrever uma situação-problema de acordo com o que pensa cada observador. São modelos que procuram explicitar as relações de causa e efeito dentro do contexto do problema, é o primeiro passo para compreender-se de forma gráfica as relações de *feedback* que existe entre eles. Através dos modelos causais é possível: a) maior compartilhamento de informações; b) maior participação na construção do modelo e c) maior comprometimento na execução da solução proposta para o problema (VILLELA, 2005 e VITOR et al., 2007).

O diagrama causal representa as relações de influência que há entre os elementos de um determinado sistema, ele permite conhecer as relações que são estabelecidas entre as variáveis componentes desse sistema: positiva (+) quando as variações ocorrem no mesmo sentido e negativas (-) quando as variações ocorrem em sentidos opostos (FIGUEIREDO, 2009; SANNINO, 2006).

Para o desenvolvimento do diagrama causal, é necessário que realize-se fundamentalmente: observações sobre o sistema estudado e análises sobre os dados do sistema estudado, para em seguida, nomear as variáveis componentes que representarão o modelo, fazer a avaliação qualitativa das relações entre esses elementos e finalmente, construir o modelo. Esses diagramas podem ser classificados segundo a sua estrutura, em diagramas abertos de estrutura simples ou diagramas fechados de estrutura complexa com laços de realimentação (ANDRADE –SOSA et al., 2008).

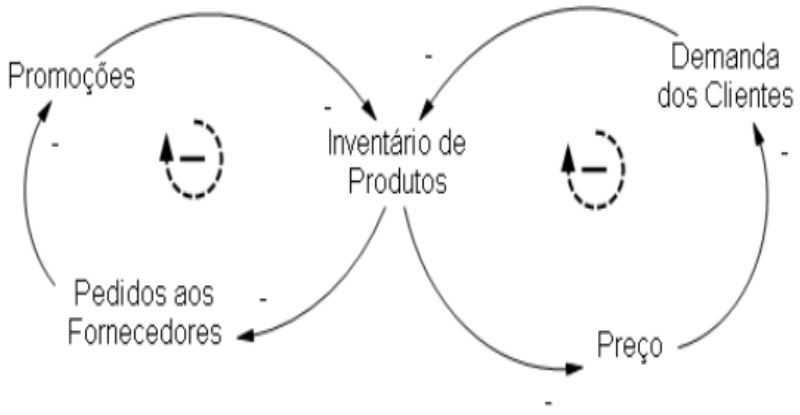

Figura 1 - Diagrama de Enlace Causal.
Fonte: KAUFFMAN (1981) apud MEDEIROS JÚNIOR (2006)

4.6 Diagrama de Fluxos e Estoques

São diagramas com representações mais elaboradas da dinâmica de funcionamento dos sistemas, possibilitando que haja uma operacionalização no sistema, ou seja, a visualização de seu comportamento por meio de modelos de simulação computacional. Por trás de todo modelo de estoque e fluxo, existe um sistema de equações matemáticas que é usado pelo programa de simulação para traçar a dinâmica do sistema modelado (VILLELA, 2005).

Os elementos básicos usados nos modelos de estoque e fluxo mostrados na Figura 2 são:

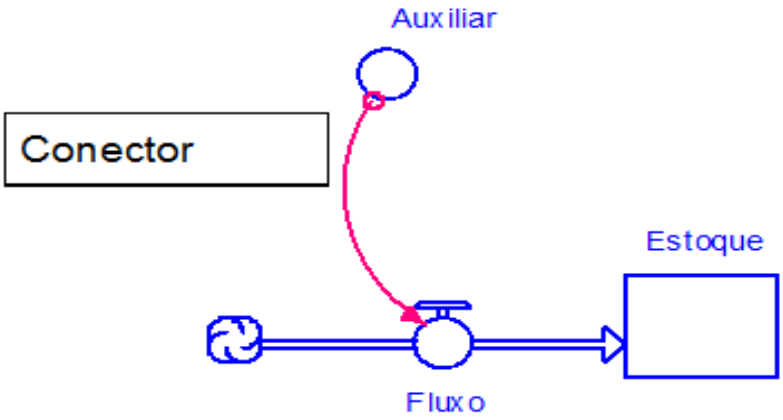

Figura 2- Componentes utilizados em diagramas de Fluxos e Estoques.
Fonte: AUTORA

Estoques representam o estado de um recurso, isto é, acumulações e retiradas de algum recurso como, por exemplo, quantidade de água retirada, quantidade de trabalhadores, área cultivada, ou número de habitantes de um determinado local.

Fluxos produzem mudança nas variáveis estoques, mostram atividades que produzem taxa de crescimento ou redução dos estoques, tal como o movimento de materiais e informações dentro de um sistema, como por exemplo, fluxo de água de uma torneira, fluxo de pessoas numa estação de metrô.

Auxiliares, podem processar informações a respeito dos estoques e fluxos, ou ainda representar fontes de informação externa ao sistema, como por exemplo, a taxa de crescimento vegetativo de um local.

Conectores são as ligações de informações que conectam Estoques e Fluxos, podendo realizar ligações de um ponto para diversos pontos.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da Região de Estudo

A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Alto Paranapanema (UGRI 14), está localizada na região Sudoeste do Estado de São Paulo entre as coordenadas 23° e 24°23’ de latitude Sul e 49°42’ e 47°22’ de longitude Oeste, limitando-se ao Norte com a UGRI 17- Médio Paranapanema, ao sul com a UGRI 11- Vale do Ribeira/ Litoral Sul, Leste com a UGRI 10- Sorocaba/Médio Tietê e a oeste com a região Nordeste do estado do Paraná, como pode ser visto na Figura 3 (CBH-ALPA, 2012).

Figura 3- Localização da UGRHI 14 no estado de São Paulo.
Fonte: CBH-ALPA (2012).

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema é composto por 35 (trinta e cinco) municípios com sede administrativa localizada na área da UGHRI 14, sendo que seis deles possuem parte do seu território em áreas de outras UGHRIs, a saber, Vale do Ribeira/Litoral Sul, Sorocaba Médio Tietê e Médio Paranapanema, de acordo com a Figura 4. Abriga cerca de 1,7% da população do estado de São Paulo, sendo que 96% da população vivem em áreas urbanas. Na área de abrangência da Bacia Hidrográfica em pauta, pode-se identificar a presença de atividades agropecuárias e agroindustriais (PLANO DE BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2011)

Na área rural predomina as culturas de cana de açúcar, arroz, pastagem, reflorestamento e existem ainda algumas Unidades de Conservação. Quanto ao uso da água, destina-se ao abastecimento público e industrial, geração de energia elétrica, lazer, recepção e diluição de efluentes domésticos e irrigação de plantações (CBH-ALPA, 2012).

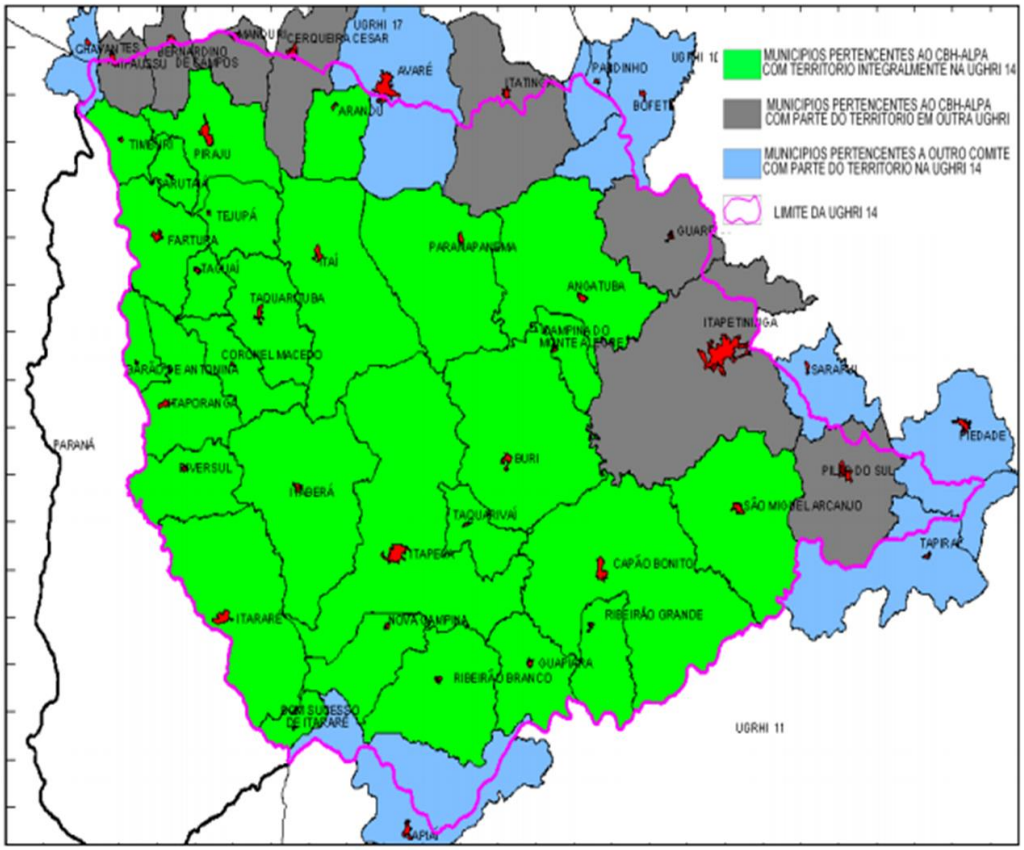

Figura 4 - Mapa dos Municípios que compõem a área da UGHRI-14.
Fonte: CBH-ALPA (2012).

A Bacia do Alto Paranapanema tem 22.547 Km^2 de área, segundo o levantamento cartográfico realizado no Relatório "Zero", e está subdividida em 16 sub-bacias de drenagem conforme a Tabela 1 (CBH-ALPA, 1999).

O principal rio da bacia é o Paranapanema, com extensão de 530 Km percorridos dentro dos limites da bacia, além desse, tem-se também os Rios: Apiaí-Guaçú, Taquarí, Itapetininga, Verde, Capivarí, Itararé e Ribeirão das Almas. (CBH-ALPA, 1999).

Tabela 1- Sub-bacias e municípios da UGRHI-14

Código	Sub-Bacia	Área de drenagem (km^2)	Municípios
21	Baixo Itararé	872,43	Fartura/ Timburi/ Taguai/ Sarutaiá/ Cel. Macedo
22	Rio Verde	1.645,39	Barão de Antonina/ Itaporanga/ Riversul/ Cel. Macedo/ Itararé/ Itaberá
23	Alto Itararé	848,64	Itararé/ Riversul/ Itaporanga/ Bom Sucesso de Itararé/ Barão de Antonina
30	Rio Paranapanema Inferior	1.608,26	Ipaussu/ Sarutaiá/ Piraju/ Manduri/ Bernardino de campos/ Timburi/ Tejupá
41	Baixo Taquari	1.963,55	Tejupá/ Itaí/ Itaberá/ Taquarituba/ Coronel Macedo
43	Alto Taquari	2.483,36	Itaberá/ Itapeva/ Nova Campina/ Ribeirão Branco/ Bom Sucesso de Itararé
51	Rib. Posses/Rio Paranapanema	1.734,18	Arandu/ Itaí/ Paranapanema
53	Rios Guarei/Jacu/Sto. Inácio/Paranapanema	2.668,17	Guareí/ Anguatuba/ Paranapanema
61	Baixo Apiaí Guaçu	879,49	Burí/ Taquarivaí
62	Rio Apiaí Mirim	828,33	Guapiara/ Capão Bonito
63	Alto Apiaí guaçu	1.118,48	Ribeirão Branco/ Itapeva/ Taquarivaí
81	Baixo Itapetininga	1.400,78	Itapetininga/ Angaduba/ Campina do Monte Alegre

83	Alto Itapetininga	1.182,44	Pilar do Sul/ Itapetininga/ São Miguel Arcanjo
91	Rio Paranapitanga/ Paranapanema	995,80	Campina do Monte Alegre/ Capão Bonito/ Buri
92	Rio das Almas	701,15	Capão Bonito/ Ribeirão Grande
93	Rio Turvo/ Paranapanema Superior	1.617,16	São Miguel Arcanjo/ Capão Bonito
	Área total	22.547,61	

Fonte: FUNDAÇÃO SEAD, 2012 apud PLANO DE BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA, 2012.

Na Bacia do Alto Paranapanema, destacam-se três principais sub-Bacias de uso agrícola: a do Ribeirão dos Carrapatos, a do Ribeirão das Posses; da qual o córrego Boi Branco faz parte; e a do Ribeirão do Santa Helena, as quais possuem, uma elevada área cultivada utilizando-se sistemas de irrigação (CBH- ALPA, 2012).

A agricultura irrigada expandiu-se enormemente, desde as primeiras iniciativas do DAEE em 1972, haja vista que, a precipitação total anual ainda que satisfatória, encontra-se má distribuída ao longo do ano, pois as chuvas concentram-se no período de outubro a março, época em que o agricultor aproveita para o desenvolvimento de culturas anuais. Porém, não é incomum a ocorrência de veranicos (vários dias seguidos sem chuva) nessa época e, quando isso acontece, as quebras de safras podem ser grandes, ou até totais. Nessas condições, dispor de irrigação, significa para o agricultor uma segurança hídrica, e garantia de uma safra boa (LPL- ENGENHARIA E MAPEAMENTO DIGITAL, 2011).

O uso da irrigação cria também condições para que seja realizado, no mínimo, mais um cultivo no período seco que vai de abril a setembro, fazendo com que haja maior produtividade e melhor aproveitamento da terra ao longo do ano, servindo deste modo, como instrumento de agregação de valor aos produtos agrícolas assim como, possibilitando a produção de produtos diferenciados, como por exemplo, sementes selecionadas.

Uma área que merece destaque quando se fala em uso de irrigação na Bacia do Alto Paranapanema é a sub-bacia do Córrego Boi Branco, pois, é uma região onde há um intenso emprego dessa técnica nos cultivos.

5.2 Aspectos Gerais do Córrego Boi Branco

O Córrego do Boi Branco é um afluente da margem esquerda do Ribeirão das Posses. Localiza-se entre as Latitudes 23º36'01''S e 23º29'00''S e Longitudes 48º48'39''W e 48º55'39''W e sua vertente direita está situada no Sudoeste do município de Paranapanema e a esquerda no Sudeste do município de Itaí (Figura 5).

Figura 5 - Localização da sub-bacia do Córrego do Boi Branco nos municípios de Itaí e Paranapanema.
Fonte: ASPIPP-FEHIDRO (2011).

A sub-bacia do Boi Branco tem uma área de 80,71 km^2 de área de drenagem (Figura 6), possui 1.148,06 metros de seu trecho médio intermitente e de acordo com o plano de Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, faz parte da sub-bacia 51 - Ribeirão das Posses/Rio Paranapanema.

Figura 6 - Área da Sub-bacia do Córrego do Boi Branco
Fonte: Adaptado de APPLE MAPS (2013).

Segundo diagnóstico do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), esse manancial é classificado como crítico, quanto à disponibilidade hídrica, pelo motivo da vazão outorgada estar acima do limite de 50% da vazão de referência (Q_7^{10}), de acordo ao disposto no artigo 14, da Lei Estadual nº 9.034, de 27 de dezembro de 1994 (PLANO DE BACIAS ALPA, 2012).

> *"Art.14 - Quando a soma das vazões captadas em uma determinada bacia hidrográfica, ou em parte desta, superar 50% (cinquenta por cento) da respectiva vazão de referência, a mesma será considerada crítica e haverá gerenciamento especial que levará em conta:"*
> *"I - o monitoramento da quantidade e da qualidade dos recursos hídricos, de forma a permitir previsões que orientem o racionamento ou medidas especiais de controle de derivações de águas e de lançamento de efluentes;"*
> *"II - a constituição de comissões de usuários, supervisionadas pelas entidades estaduais de gestão dos recursos hídricos, para o estabelecimento, em comum acordo, de regras de operação das captações e lançamentos;"*
> *"III - a obrigatoriedade de implantação, pelos usuários, de programas de racionalização do uso de recursos hídricos, com metas estabelecidas pelos atos de outorga."*

Conforme informações obtidas *in loco* o Boi Branco é uma bacia onde o uso da água é voltado estritamente para a prática de atividades agrícolas, nas quais, a maioria dos cultivos são desenvolvidos sob sistema de irrigação por pivô central, como pode ser observado na Figura 6.

5.3 Delimitação da Área

Para realizar a delimitação e a caracterização da área de drenagem da referida Bacia, utilizou-se as cartas cartográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Guarizinho (folha: SF-22-Z-D-V-1) e Jurumirim (folha: SF-22-Z-D-II-3), ambas do ano de 1973 e com escala de 1:50.000, as quais encontram-se disponíveis na internet para acesso através da página (http://loja.ibge.gov.br/cartas-mapas-e-cartogramas.html?p=27). A ferramenta utilizada para fazer a vetorização que caracteriza toda a área da bacia foi o Sistema de Informação Geográfica (SIG) Quantum Gis, versão 1.8.0.

Foram executadas as seguintes etapas: Georreferenciamento de ambas as cartas, o corte da carta Guarizinho, a junção e em seguida, efetuou-se a vetorização do limite da área da bacia, das redes de drenagem, das curvas de nível e dos pontos cotados conforme a Figura 7.

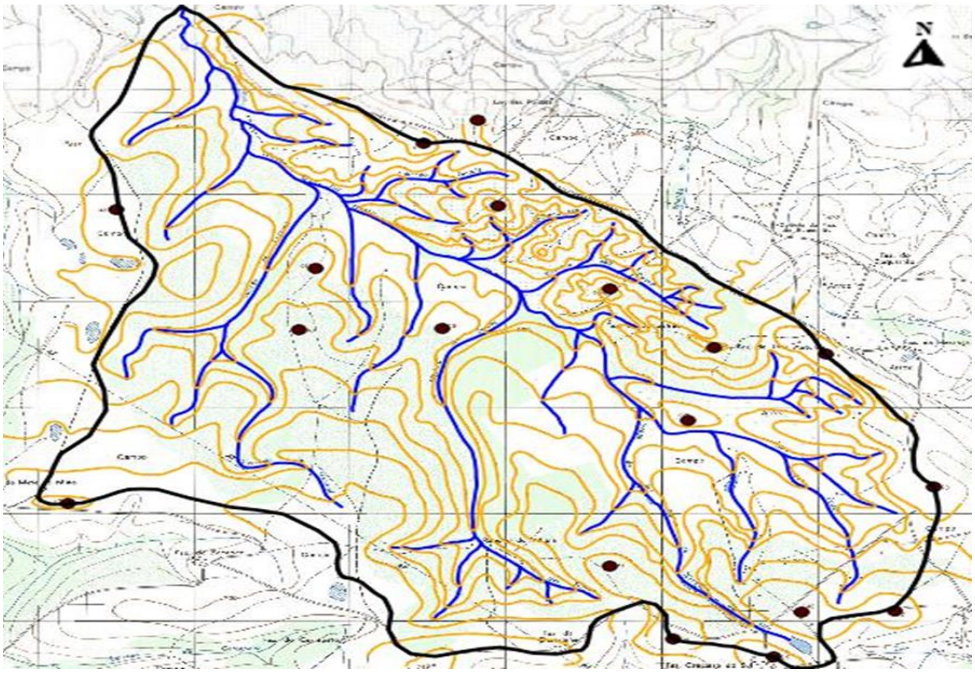

Figura 7- Área da Sub-Bacia do Córrego do Boi Branco com caracterização topográfica e rede de drenagem.

Fonte: Adaptado de IBGE (1973).

Em relação à topografia, pode-se dizer que a área não apresenta uma declividade muito elevada, podendo ser classificada como suave ondulada a ondulada o que está de acordo com o relatório número 3 da ASPIPP-FEHIDRO (2011) (Associação do Sudoeste Paulista de Irrigantes e Plantio na Palha e Fundo Estadual de Recursos Hídricos). Pois segundo o relatório, os terrenos da sub-bacia do córrego Boi Branco predominam declividades entre 6% e 12%. Declividades superiores a 20% ocorrem apenas em cerca de 7% da área predominantemente associadas aos trechos mais encaixados de cursos d'água, particularmente em cabeceiras de drenagem.

5.4 Características morfológicas

Para a realização da caracterização morfológica dessa sub-bacia, foram necessárias a aquisição de atributos básicos, a saber: área, perímetro, comprimento axial,

comprimento do rio principal e comprimento total dos rios tributários. Todos esses dados foram obtidos a partir da Figura 7.

A partir desses atributos, foram calculados os índices de forma da sub-bacia, traduzidos nos valores de coeficiente de compacidade (Kc), fator de forma (Kf), índice de circularidade (Ic) e densidade de drenagem (Dd).

O formato superficial da bacia hidrográfica é importante pela influência que exerce no tempo de transformação da chuva em escoamento e sua constatação na seção de controle. O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características morfológicas, ou seja, área, forma geométrica, topografia, geologia, solo, cobertura vegetal e de processos como escoamento superficial, deflúvio, e suas inter-relações (BERTONI e TUCCI, 2007).

Coeficiente de Compacidade (Kc): é a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. Esse coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da bacia independente do seu tamanho. O menor valor que Kc pode tomar é 1. Quanto maior o Kc menos compacta é a bacia, maior é o perímetro em relação à área e portanto, menor tendência para cheias ela terá (VILLELA; MATTOS, 1975 apud FERREIRA et al., 2010). Para a determinação do Kc utilizou-se a Equação 1:

$$\boldsymbol{Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}} \qquad \textbf{(1)}$$

Em que, Kc é o coeficiente de compacidade; P é o perímetro em (km) e A é a área de drenagem (km²).

Fator de Forma (Kf): é a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia (da foz ao ponto mais longínquo do espigão). Uma bacia com fator de forma baixo indica que a mesma é menos sujeita a enchentes que outra, de mesmo tamanho, porém com fator de forma maior (VILLELA ; MATTOS, 1975 apud FERREIRA et

al., 2010). Esse fator foi calculado a partir da Equação 2.

$$Kf = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{L}^2} \quad \textbf{(2)}$$

Em que, Kf é o fator de forma; A é a área da bacia (km^2) e L é comprimento axial (km).

Índice de Circularidade (Ic): Simultaneamente ao coeficiente de compacidade, esse índice tende para a unidade à medida que a bacia aproxima-se a forma circular e diminui à medida que a forma torna-se alongada. Ele foi calculado pela Equação 3, proposta por Miller (1953) apud Ferreira (2010):

$$Ic = 12{,}57 * \frac{A}{P^2} \quad \textbf{(3)}$$

Em que Ic é o índice de circularidade; A é a área (km^2) e P é o perímetro (km).

Ordem dos Cursos d'água: A ordem dos cursos d'água pode ser determinada seguindo os critérios introduzidos por Horton (1945) e Strahler (1957). Utilizou-se neste trabalho a classificação apresentada por Strahler, em que os canais sem tributários são designados de primeira ordem. Os canais de segunda ordem são os que se originam da confluência de dois canais de primeira ordem, podendo ter afluentes também de primeira ordem. Os canais de terceira ordem originam-se da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens, e assim sucessivamente. A junção de um canal de certa ordem a um canal de ordem superior não altera a ordem deste.

Densidade de drenagem (Dd): é o resultado da divisão entre o comprimento total dos cursos d'água pela área da bacia. É um índice que pode variar de 0,5 $km.km^2$ em bacias com drenagem pobre a 3,5 $km.km^2$ ou mais em bacias bem drenadas (VILLELA; MATTOS, 1975). Reflete as condições topográficas, pedológicas, hidrológicas e de vegetação da bacia. Para a determinação da Dd utilizou-se a Equação 4.

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad \textbf{(4)}$$

Onde Dd é a densidade de drenagem; Lt é o comprimento total dos canais (km) e A é a área da bacia (km²).

5.5 Características de uso e ocupação do solo

Foi utilizada uma imagem de satélite da Apple Maps do ano de 2013 para obter o mapa de uso e ocupação do solo. Com esse procedimento foi possível identificar a presença de mata ciliar, açudes, agricultura irrigada e área de uso agropecuário conforme a Figura 8.

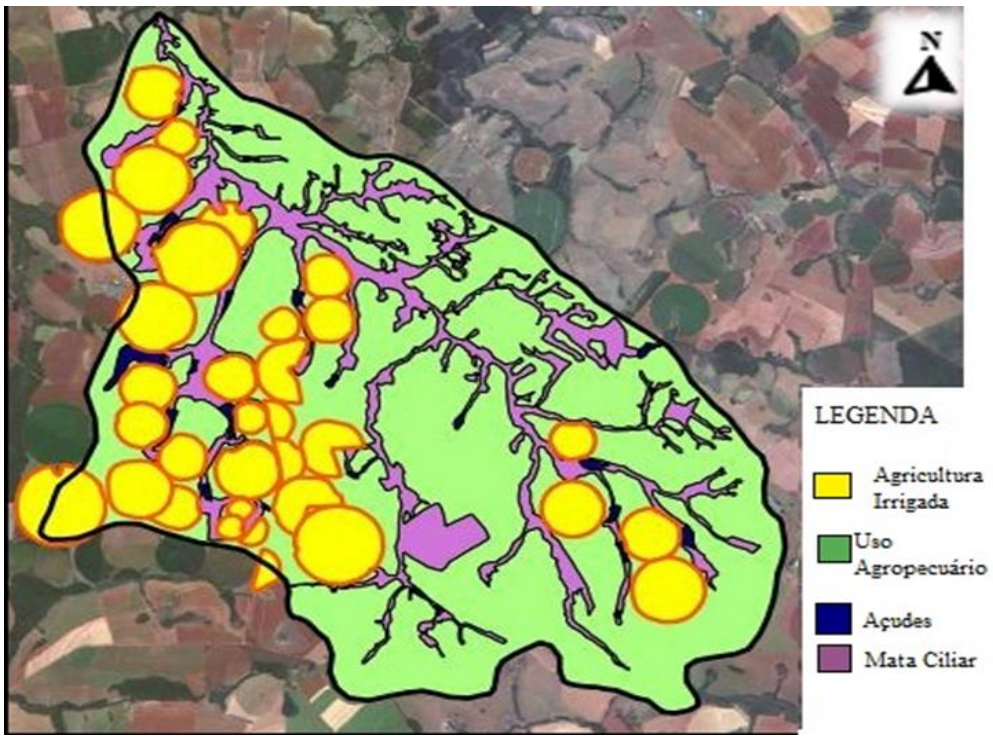

Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do solo.

Fonte: Adaptado de APPLE MAPS (2013).

Mata Ciliar: é a vegetação que margeia as nascentes e os corpos d'água e que tem a função ambiental de manter a qualidade da água, a estabilidade dos solos quanto à erosão, a regularização dos ciclos hidrológicos e a conservação da biodiversidade. No total, essa categoria de cobertura das terras ocupa 12,90 km^2, ou seja, 15,98% da área da sub-bacia.

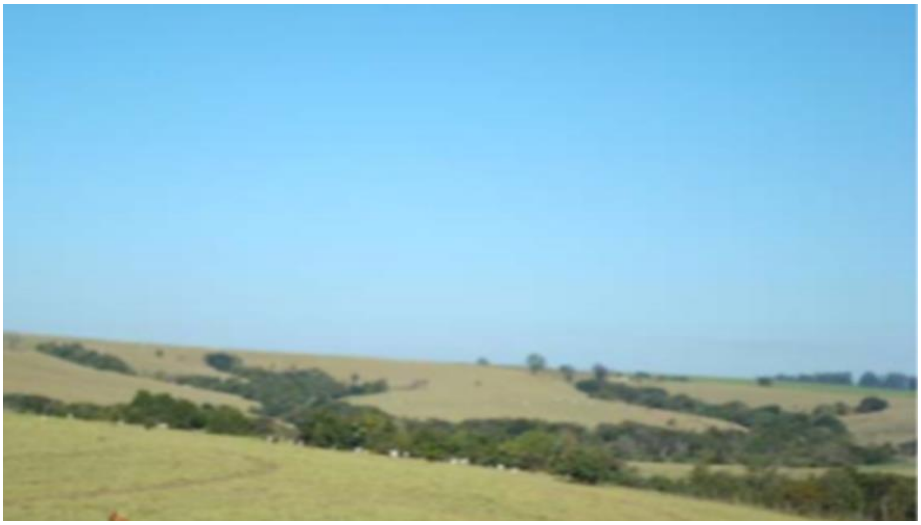

Figura 9 - Foto da área de vegetação ciliar na sub-bacia do córrego Boi Branco.
Fonte: ASPIPP-FEHIDRO (2011).

Agricultura Irrigada: são as culturas temporárias; as de ciclo vegetativo curto, anual. Aparecem como terra preparada para plantio, terrenos em pousio e culturas em desenvolvimento. As glebas geralmente apresentam estrutura em círculos totais ou parciais, que é a área ocupada por cada pivô, haja vista que na área da sub-bacia há o predomínio dos cultivos utilizando irrigação por pivô central, adotou-se a área total irrigada como a soma das áreas dos pivôs. Na área de estudo predominam os cultivos de trigo, algodão, milho, feijão, batata e soja, abrangendo 20,09 km^2, que representa 24,90% da área da sub-bacia.

Figura 10- Área cultivada pela cultura do feijão (Phaseolus sp.) e irrigada por pivô central na sub-bacia do córrego Boi Branco.
Fonte: AUTORA.

Essas culturas são cultivadas em sistema de rotação de culturas, a qual consiste em alternar, anualmente, espécies vegetais, numa mesma área agrícola. O modelo de produção adotado é a safra agrícola na qual, as culturas que fazem parte da safra são rotacionadas sobre a área por um período de 24 meses e depois, outras culturas as substituirão, começando assim, outro ano e/ou safra agrícola.

Açudes: Na área do córrego do Boi Branco foram identificados 39 espelhos de água, perfazendo, no total, 1,17 km^2, o que representa 1,45% da área da sub-bacia; predominando açudes com área de espelho d'água inferior a 5 hectares.

Figura 11 - Vista de um açude na sub-bacia do córrego Boi Branco.
Fonte: ASPIPP-FEHIDRO (2011).

No tocante aos açudes, a construção desses reservatórios artificiais na sub-bacia do córrego do Boi Branco tem-se mostrado útil, principalmente em períodos de estiagem, uma vez que sua finalidade é armazenar água que usada para irrigação, pois se trata de uma área com alta atividade agrícola.

Uso Agropecuário: Abrange a cobertura vegetal que está caracterizada por uma paisagem fortemente antropizada, marcada por áreas de pasto e diferentes culturas (cana de açúcar, eucalipto e pinus) ocupa cerca de 46,54 km^2, o que representa, 57,67% da área total da sub-bacia. Segundo informações adquiridas no local de estudo, essa categoria de uso e ocupação de solo não tem uso de sistemas de irrigação.

A área de pastagem inclui pastagens artificiais ou plantios de forrageiras para pastoreio, em diversos níveis de tecnificação e manejo, além de pastagens de vegetação espontânea que sobrevêm aos desmatamentos. Caracterizam-se como coberturas residuais baixas, até rasteiras, representadas por glebas com cobertura do solo variável.

Figura 12 - Predomínio de Pastagem/Campo antrópico.
Fonte: ASPIPP-FEHIDRO (2011)

Tabela 2- Uso e ocupação do solo.

Uso e ocupação	Área (Km^2)	Porcentagem de ocupação (%)
Mata ciliar	12,90	15,98
Açudes	1,17	1,45
Agricultura Irrigada	20,09	24,90
Área de uso Agropecuário	46,54	57,67
Total	80,70	100

Fonte: AUTORA

5.6 Características geológicas pedológicas

De acordo ao relatório número 3 da ASPIPP-FEHIDRO (2011) a formação geológica, na área da Sub-bacia do córrego do Boi Branco predominam rochas da Formação Estrada Nova, que ocorrem no setor norte da Sub-bacia, por onde escoa o Ribeirão das Posses (Tabela 3).

Tabela 3 - Geologia na sub-bacia do córrego do Boi Branco: proporção de ocorrência das rochas.

Grupo	Formação	Litologia	Proporção de ocorrência (%)
Passa Dois	Formação Estrada nova	Siltitos, arenitos finos, níveis de calcário oolitico	51,28
	Formação Irati	Folhelhos, siltitos e calcário dolomítico	24,37
Tubarão	Formação Tatuí	Arenitos,siltitos, diamicitos e folhelhos	23,39
Sills e diques de diabásio			0,97

Fonte: RELATÓRIO TÉCNICO Nº 3 (ASPIPP-FEHIDRO, 2011).

O córrego do Boi Branco tem suas nascentes em terrenos compostos por rochas da Formação Estrada Nova para, a seguir, escoar sobre rochas da Formação Irati até encontrar o ribeirão das Posses.

Os afluentes da margem esquerda do córrego do Boi Branco escoam sobre terrenos correspondentes a rochas das formações Tatuí, Irati e Estrada Nova. Particularmente o rio das Furnas corre sobre diabásio.

Os afluentes da margem direita escoam, predominantemente, sobre terrenos compostos por rochas da Formação Irati. A maior parte do ribeirão das Posses encontra-se em terrenos formados por rochas da Formação Estrada Nova.

Com relação aos tipos de solos, a associação de solo que abrange a maior extensão da área da sub-bacia é a LV1 (Latossolos Vermelhos Álicos, Distróficos e Eutróficos) típicos de texturas argilosa e muito argilosa e, Latossolos Vermelhos Eutroférricos de textura muito argilosa, ambos com horizonte A moderado (RELATÓRIO TÉCNICO Nº 3 ASPIPP-FEHIDRO, 2011).

5.7 Características pluviométricas

No tocante a pluviosidade média anual e mensal na área da sub-bacia, o mês de janeiro é mais chuvoso registrando precipitações superiores a 200 mm, e o mês de agosto o mais seco, com precipitações inferiores a 40 mm.

Os dados de precipitação, utilizados nesse trabalho, encontram-se disponíveis na internet para acesso através da página do DAEE (http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi- bin/bdhm.exe/plu?lig=podfp). Para se saber quais postos seriam usados, verificou-se no Relatório Técnico número 3 (2011) os postos próximos a área, dos nove pluviômetros listados, foram utilizados dois: E5-065 e E5-067.

Para a realização desse trabalho utilizou-se os dados de precipitação mensal para posteriormente realizar a média anual para a série de dados do período de 1971 a 1995. Os valores de precipitação estão expressos em altura de lâmina d'água (mm). Os dados utilizados no estudo levam em conta os valores de precipitação acumulada de cada ano da série, medidos em cada posto pluviométrico. Na Tabela 4 podem-se observar os dados das estações pluviométricas utilizadas.

Tabela 4 - Pluviosidade média total anual nos postos (mm).

Postos	E5-065	E5-067
1971	----	1.030,60
1972	1.404,50	1.564,20
1973	----	1.543,80
1974	1.490,90	1.179,10
1975	1.182,40	1.195,00
1976	1.571,20	1.374,50
1977	1.260,60	1.161,30
1978	1.129,90	1.274,00
1979	----	----
1980	----	1.250,10
1981	----	1.069,00

1982	1.646,70	1.523,90
1983	----	2.034,00
1984	1.204,80	916,50
1985	882,80	839,50
1986	1.535,70	1.527,10
1987	----	1.412,00
1988	1.261,80	1.483,50
1989	1.734,50	1.686,30
1990	1.356,60	1.247,60
1991	1.508,10	1.817,60
1992	1.526,10	1.470,60
1993	1.568,60	1.299,70
1994	----	1.188,50
1995	----	1.612,40
Média	1.391,58	1.350,72

Fonte: DAEE (2013)

Preenchimento das Falhas pelo Método da Ponderação Regional

Essa série de dados pluviométricos obtida do site do DAEE apresentava falhas nos registros de precipitação, sendo necessário deste modo, realizar o preenchimento das falhas. Para isso foi utilizado o método da ponderação regional, descrito por Bertoni e Tucci (2007), essa metodologia visa à análise estatística das precipitações e a homogeneização do período de informações.

Esse método foi escolhido devido á sua simplicidade e por que sua utilização é indicada para o preenchimento de falhas de dados mensais ou anuais de precipitações. Para aplicação deste método necessita-se dos valores de precipitação de três postos pluviométricos próximos, que estejam em região climatológica semelhante e com no mínimo dez anos de dados, o que foi observado nos dados conseguidos para o estudo, pois a

série em questão tem 24 anos de dados. Para a realização dos cálculos foi utilizada a Equação 5.

$$P = \frac{1}{3} * \left[\frac{x1}{xm1} + \frac{x2}{xm2} + \frac{x3}{xm3}\right] * Pm \qquad \textbf{(5)}$$

Em que P é a precipitação a ser estimada para o posto com falha; x1, x2 e x3 são as precipitações correspondentes ao mês que deseja preencher, correspondem às precipitações registradas pelas estações vizinhas; xm1, xm2 e xm3: equivalem às médias aritmética de precipitação das respectivas três estações vizinhas e Pm é precipitação média mensal ou anual no posto pluviométrico em que se está preenchendo os dados.

Após o preenchimento das lacunas apresentadas nas séries mensais e anuais de precipitação, analisou-se a consistência dos dados através do método dupla massa. Uma planilha eletrônica no programa Excel foi utilizada para organizar as séries anuais de precipitação das Estações (E5-065 e E5-067); foram inseridas na planilha três colunas sendo duas referentes ao precipitado acumulado nas duas estações que estão sendo analisadas e outra referente à estação de apoio. Com esses dados, construiu-se um gráfico de dispersão contendo no eixo (x) o precipitado acumulado na estação de apoio e no eixo (y) o precipitado acumulado nas estações em análise.

Cálculo da Precipitação Média pelo Método do Polígono de Thiessen

A precipitação média para a área da sub-bacia foi calculada utilizando-se o método do polígono de Thiessen gerado de forma semiautomática pelo SIG Quantum Gis 1.8.0. A localização dos nove postos pluviométricos foi inserida no programa em coordenadas UTM, os arquivos foram importados em formato CSV, contendo duas colunas referentes às coordenadas horizontal e vertical e nove linhas referentes a cada posto pluviométrico.

Para gerar os polígonos de Thiessen, foi utilizada a ferramenta diagrama de Voronoi parametrizado em função dos pontos do *layer pontos_postos.* Assim, foi possível chegar a área de influência de cada posto para a área da sub-bacia.

Conforme a Figura 13, observa-se que de todos os postos listados no Relatório Técnico de 2011 nenhum encontra-se efetivamente dentro da área de estudo.

Contudo, utilizando esse método foi possível perceber que apenas dois postos (E5-065 e E5-067) contribuem efetivamente com dados de precipitação para a área da sub-bacia do córrego do Boi Branco.

Esse método analisa a variabilidade espacial da precipitação em Bacias Hidrográficas e é indicado quando não existe uma distribuição uniforme de pluviômetros no interior da bacia, contudo, para que os resultados sejam bons os terrenos deverão ser pouco acidentados e as distâncias entre os pluviômetros pouco extensas; características essas apresentadas pela área de estudo.

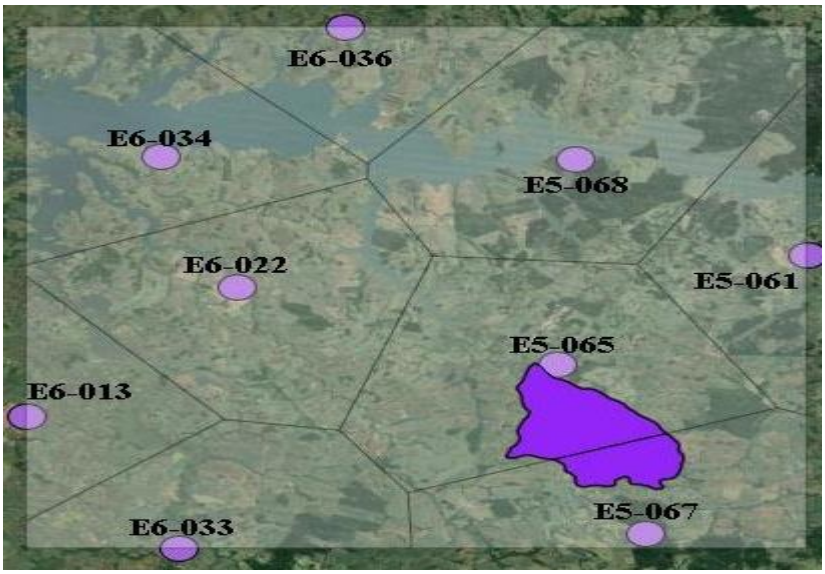

Figura 13 - Ilustração do Polígono de Thiessen utilizando o software Quantum Gis 1.8 para determinar a pluviosidade média anual na área da sub-bacia do córrego do Boi Branco.
Fonte: AUTORA

A precipitação média é calculada pela média ponderada da precipitação de cada estação e o fator a ela atribuído, que é a área de influência da precipitação de cada posto dentro da bacia. Para o cálculo da precipitação média dentro da sub-bacia foi utilizada a Equação 6. Com a finalidade de facilitar o entendimento da equação, nomearemos o posto E5-065 de "X" e o posto E5-067 de "Y".

$$Pm = \frac{(Px*Ax)+(py*Ay)}{At} \qquad \textbf{(6)}$$

Em que Pm é a precipitação média na área da Bacia; Px e Py são as precipitações médias de cada posto; Ax e Ay são as áreas de influência de cada posto; At é a área total da bacia.

Cálculo da Precipitação para os Níveis de Probabilidades de Ocorrência

A precipitação pluvial de um determinado local pode ser estimada, dentre outras formas, em termos probabilísticos, mediante modelos teóricos de distribuição ajustados a uma serie de dados. A estimativa de precipitação pluviométrica provável para a área da sub-bacia foi obtida para os níveis de 75%, 50% e 25% de probabilidade, utilizando-se o cálculo de distribuição de frequência acumulada através do método de Kimbal, pela Equação 7.

$$F = \frac{M}{N+1} \qquad \textbf{(7)}$$

Onde M é o número de ordem do evento e N é o número de anos de observação.

Nessa metodologia, os dados observados devem ser classificados em ordem decrescente e a cada um atribuir-se o seu número de ordem. De um modo geral, esse método é mais utilizado quanto maior for o número de ocorrência de um evento.

Evapotranspiração Potencial Estimada para a área

Sales (2014) estimou os dados de evapotranspiração potencial (ET_0) mensais para a área de estudo. Para isso, utilizou-se dados de precipitação de dois postos pluviométricos (E5-065 e E5-067) e aplicou a metodologia descrita por Thornthwaite (1948) para temperaturas entre 0 °C a 26 ºC. Calculou-se os valores que encontram-se na Tabela 5 usando a Equação 8.

$$ET_P = 16 * (10 * Tm/I)^a \qquad \textbf{(8)}$$

Sendo, ETp a evapotranspiração potencial (mm); Tm a temperatura média mensal (°C), I é um índice térmico anual e "a" é uma constante que varia de local para local.

Tabela 5 - Evapotranspiração Potencial mensal em (mm) para a área da sub-bacia do córrego Boi Branco.

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
111,8	108,6	108,6	91,7	79,8	56,0	56,8	65,0	70,8	102,3	100,2	118,8

Fonte: SALES (2014)

O que resulta em um valor total anual de 1.070,4 mm de evapotranspiração.

5.8 Demanda de água dos diversos setores

O MRH-BB (Modelo do Recurso Hídrico do Boi Branco) foi desenvolvido para representar a estrutura da demanda de água da população rural, da produção agrícola, e a demanda do tipo ambiental requerida para manter a vida dos ecossistemas do lugar e para analisar a sustentabilidade na sub-bacia, compreendendo também a oferta de água disponível para a região. A qual foi estimada, com base na vazão média plurianual do córrego do Boi Branco de 0,551 m^3ano^{-1}, e ao volume disponível de água subterrânea, por falta de dados mais precisos, este último foi expresso como uma porcentagem (10%) das precipitações média anual.

A demanda de água pelos diversos setores teve como base informações adquiridas *in situ*. Para ser efetiva, a modelagem da agricultura irrigada na sub-bacia do Boi Branco, foi necessário o conhecimento das condições de uso dos recursos hídricos. Assim foram levantados dados referentes ao tamanho da área irrigada conforme a Figura 8, consumo médio anual de água pelas culturas, disponibilidade de água e vazão média plurianual.

5.9 Dinâmica de sistemas

A metodologia usada no presente estudo é a Dinâmica de Sistemas, fundamentada no pensamento sistêmico, que envolve mudanças de paradigmas sobre como as coisas funcionam. Através de Dinâmica de Sistemas (DS), pode-se analisar o comportamento dos sistemas complexos, incluindo todas as relações de causa e efeito relevantes, os atrasos e os enlaces de retroalimentação. Essa metodologia tende a facilitar a visualização das inter-relações entre os elementos dos sistemas; identifica soluções em longo prazo para os problemas; procura pontos onde pequenas mudanças trarão efeitos positivos ao sistema e evitam soluções que tratam apenas dos sintomas dos problemas (POWERSIM, 1996, apud SÁNCHEZ-ROMAN et al., 2009).

5.9.1 Desenvolvimento de um Modelo em Dinâmica de Sistemas

A utilização de Dinâmica de Sistemas como metodologia para o desenvolvimento de um modelo justifica-se por que é uma ferramenta que permite representar o comportamento de sistemas complexos utilizando um computador para simular modelos matemáticos tornando possível controlar e explorar um sistema real.

De acordo com Orellana-González (2010), Orellana-González (2006), Sánchez-Román et al. (2010), Sánchez-Román et al. (2009), Souza et al. (2010), Vieira (2008), a metodologia de Dinâmica de Sistemas pode subsidiar em problemas de gestão de recursos hídricos entre outros de maneira plausível.

Radzicki (1997) apud Sannino (2006) definiu um modelo como uma representação externa e explícita de parte da realidade percebida pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade.

De acordo com Forrester (1961) apud Orellana-González (2010), as etapas que descrevem o desenvolvimento de um modelo de DS são: **a)** Definição do problema a ser estudado e as perguntas que deverão ser respondidas; **b)** Descrição da situação; **c)** Modelo matemático; **d)** Simulação do modelo; **e)** Interpretação; **f)** Revisão do sistema e repetição do experimento. A autora considerou importante saber onde se quer chegar com o

modelo e ter ciência de quais caminhos levam à construção de um sistema que contenha as variáveis primordiais que representam a realidade que se deseja estudar.

Já para Richardson (1991) apud Sánchez-Román et al. (2009), as principais características da metodologia de DS são: **a)** definição dos problemas dinamicamente; **b)** enfoque nas características intrínsecas do sistema; **c)** conceituação do sistema real por meio da interconexão contínua de círculos de retroalimentação e de causalidade; **d)** identificação de estoques e fluxos de entrada e saída; **e)** formulação de um modelo comportamental, capaz de reproduzir a dinâmica do problema; **f)** entendimento e esclarecimento derivado de mudanças políticas efetuadas no modelo e seus consequentes resultados; e **g)** implementação de mudanças e novas políticas com base nesses entendimentos.

Orellana-González (2010) sintetizou as etapas de desenvolvimento de DS em três principais etapas: i) Etapa de conceitualização; ii) Etapa de formalização e ii) etapa de avaliação e exploração.

As etapas descritas anteriormente fazem-se necessárias para analisar as visões desejadas de um determinado modelo, obtendo um retrato de como poderia ser o futuro, tornando-se uma orientação para gerar o modelo mental que auxiliará na busca dos objetivos planejados.

5.9.2 Construção de modelos em Dinâmica de Sistemas

Para a construção do modelo de estoques e fluxos e para a análise dos resultados foi utilizado o programa STELLA, versão 9.1.3 para *Windows*. Esse programa foi escolhido pela sua capacidade de representar um modelo na forma de um diagrama animado, no qual, possíveis cenários são criados para simular uma situação real e também por ele ser frequentemente usado por pesquisadores que trabalham com o enfoque de DS na modelagem de problemas complexos que integram variáveis físicas, sociais e econômicas, como é o caso dos recursos hídricos (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2009; ORELLANA-GONZÁLEZ, 2006).

Esse programa trabalha com programação orientada a objetos. Cada ícone que se utiliza tem uma função específica, com uma conformação de estruturas ou diagramas representativos do modelo matemático utilizado para representar os fenômenos

desejados. A organização dos elementos tem uma associação direta com o enfoque sistêmico e a dinâmica de sistemas, que permitem aos diagramas do modelo e seus algoritmos, representarem subsistemas dentro de um sistema global e suas inter-relações. Esse software permite a construção e a simulação do modelo dinâmico, considerando estoques, fluxos e relações circulares de retroalimentação entre seus diversos componentes, gera automaticamente e disponibiliza equações e gráficos para o modelo.

5.9.3 Diagrama Causal do Modelo (Etapa de conceitualização)

O diagrama causal representa as relações mais importantes para o estudo da estrutura de oferta e demanda hídrica na sub-bacia do córrego Boi Branco. Esse diagrama contém os principais componentes da estrutura de um modelo de recursos hídricos que analisa o balanço entre a água disponível e a água requerida. Para o desenho do diagrama causal que representa a condição da sub-bacia do córrego Boi Branco tomou-se como base o diagrama proposto por Sánchez-Román et al. (2009).

A Figura 14 está representando a estrutura do sistema do recurso hídrico modelado. Descreve de forma esquemática o sistema estudado para analisar a sustentabilidade do recurso água na região de estudo, em que as variáveis que representam a oferta de água são as águas superficiais e subterrâneas, que garantem o estoque de água no MRH-BB. A demanda de água está constituída pelos seguintes requerimentos: população rural, ambiental e agricultura.

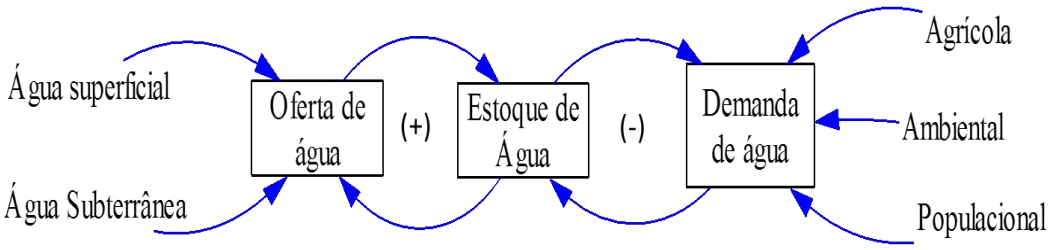

Figura 14 - Diagrama Causal do modelo para a sub-bacia do córrego Boi Branco.
Fonte: Adaptado de SÁNCHEZ-ROMÁN et al. (2009)

Esse diagrama permitiu estabelecer os principais componentes do MRH-BB, e identificar as relações de causalidade mais importantes que existem entre eles, ele permite visualizar o tipo de relação que existe entre os elementos que compõem o modelo. Para a sua elaboração foi utilizado o programa VENSIM versão 5.5 para *Windows*.

De acordo com o observado na Figura 14, pode-se identificar os principais componentes do sistema, assim como a interação que há entre eles, sendo esta última a que proporciona as características estruturais ao presente sistema. Nesse esquema, a soma da água superficial com a água subterrânea representa a oferta total de água, o estoque, é a água armazenada, ou seja, local de onde se fazem as retiradas e os demais componentes representam as demandas avaliadas: agrícola, que representa a quantidade de água consumida pela irrigação para os cultivos; ambiental, a qual indica a quantidade mínima de água que necessita permanecer no rio para que as condições mínimas do habitat sejam mantidas e populacional que indica a demanda de água pelo consumo doméstico.

No que se refere às relações estabelecidas entre os componentes desse sistema, pode-se observar que para as variáveis "Oferta de Água" e "Estoque de Água" a interação é positiva, pois, quanto maior a oferta de água, maior será a quantidade de água estocada, mostrando que as mudanças nas duas variáveis ocorrem na mesma direção, representando-se, portanto, com o sinal (+), porém, ao analisar-se as variáveis "Estoque de Água" e "Demanda de Água", quanto maior a quantidade de água demandada pelos setores agrícola, ambiental e populacional; menor será a quantidade de água em estoque, o que nos mostra que as mudanças que ocorrem nessas duas variáveis, acontecem em sentidos opostos e por esse motivo, se representa pelo sinal (-).

5.9.4 Diagrama de Estoque e Fluxo (Etapa de formalização)

O diagrama causal do modelo permitiu desenhar o diagrama de estoques e fluxos (Figura 15), que de forma mais detalhada descreve o funcionamento do sistema da sub-bacia do córrego do Boi Branco, haja vista, ser a base na qual se define as equações do modelo. Esse modelo foi uma junção dos modelos propostos por SÁNCHEZ-

ROMÁN et al., 2009 para a bacia do PCJ e por ORELLANA-GONZÁLEZ, 2006 para a bacia em São Miguel do Anta.

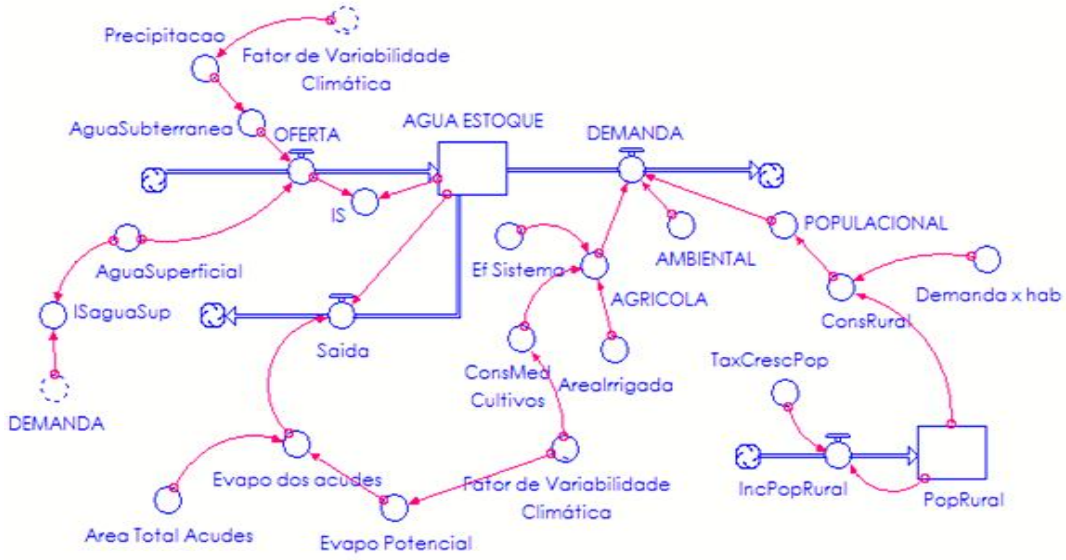

Figura 15 - Diagrama de Estoque e Fluxo do MRH-BB.
Fonte: AUTORA

A conversão deu-se de seguinte forma: uma vez representados no diagrama causal, os componentes principais do modelo de oferta e demanda de recursos hídricos da sub-bacia, setor agrícola, população e ambiental, assim como as relações principais existentes entre elas, elaborou-se o modelo matemático representado pela Figura 15. As estruturas básicas para o desenho do diagrama são os estoques e os fluxos (ver Figura 2).

Os estoques representam o modelo das acumulações dos recursos e também suas restrições. Representam as condições, mostrando como está a situação. São as variáveis que acumulam mudanças influenciadas pelos fluxos. Nesse caso, o estoque constitui a água estocada (água estoque) sobre a influência da oferta e da demanda hídrica do modelo da sub-bacia do córrego Boi Branco.

Os fluxos representam as ações que enchem e esvaziam os estoques, e mostram como os sistemas estão desenvolvendo-se, são variáveis dependentes do tempo. Nesse modelo se têm os fluxos que estão alimentando a oferta hídrica. Essa oferta está constituída pelas águas superficiais do córrego Boi Branco e seus afluentes e pelas águas

subterrâneas. De outro lado, tem o fluxo que representa a demanda hídrica do modelo. Esse está composto pelo consumo de água do setor agrícola, pela população rural e pela demanda ambiental, essa última é constituída pela vazão mínima que o rio deve ter para manter a vida dos ecossistemas, equivale a uma oferta mínima de água limpa.

Os outros elementos demonstrados no modelo e que determinam os fluxos, se resumem em variáveis auxiliares e constantes, tais como a área irrigada, eficiência de sistema, consumo rural, precipitação etc. As relações entre as variáveis neste diagrama se indicam através de setas, e são chamados de conetores. Estas ligam os estoques às variáveis auxiliares ou às constantes, os estoques aos reguladores de fluxos, e as auxiliares ou as constantes a outras auxiliares ou constantes.

5.9.5 Descrição matemática do modelo

Por trás de todo modelo de estoque e fluxo, existe um sistema de equações matemáticas diferenciais que é usado pelo programa de simulação para traçar a dinâmica do sistema modelado. Assim as relações são expressas através de um conjunto de fórmulas matemáticas.

a) Estimativa da Oferta de Água

A oferta total de água disponível está expressa em metros cúbicos por ano ($m^3 ano^{-1}$) pela Equação 9 de balanço de massa:

$$\text{Oferta} = \text{Água Superficial} + \text{Água Subterrânea} \qquad \textbf{(9)}$$

a.1) Águas Superficiais

Para o estudo dos recursos hídricos superficiais, utilizou-se a vazão média plurianual disponibilizada no *site* do DAEE (http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/regnet.exe/calcgeo#r) cujo valor é igual a $0{,}551 m^3 s^{-1}$.

a.2) Águas subterrâneas

A disponibilidade de águas subterrâneas estimou-se considerando, que 10% total das precipitações anuais, infiltram-se profundamente para o lençol freático (REICHARDT, 1978).

b) Estimativa da demanda de água

A demanda total de água mostra o volume do recurso hídrico que é requerido. A unidade de medida é metros cúbicos por ano (m^3ano^{-1}) e é expressa pela Equação 10:

$$\text{Demanda} = \text{Agrícola} + \text{Ambiental} + \text{Populacional} \quad \textbf{(10)}$$

b.1) Demanda agrícola de água

A demanda agrícola compreende a água utilizada para a irrigação. Nesse trabalho a água para irrigação estimou-se multiplicando a área total irrigada em hectare, pelo consumo médio de água dos cultivos em m^3ano^{-1} e dividindo-se pela eficiência do sistema de irrigação. A área irrigada foi determinada conforme pode ser visto na Figura 8 e o consumo médio dos cultivos foi estimado de acordo com dados adquiridos *in situ*. Os cálculos foram efetuados conforme a Equação 11.

$$\text{Agrícola} = (\text{AreaIrrigada} * \text{ConsMedcultivos} * 10)/(\text{Efsistema}) \quad \textbf{(11)}$$

Onde, ConsMedcultivos é o consumo médio dos cultivos, 10 é o fator para transformar de milímetros (mm) para metros cúbicos por hectare (m^3ha^{-1}) para poder multiplicar pela área e deixar em metros cúbicos (m^3) somente e Efsistema é a eficiência do sistema de irrigação de acordo com a metododlogia de Mendoza e Frizzone (2012).

b.2) Demanda populacional de água

A demanda de água populacional nesse caso é a quantidade de água consumida pela população rural, pois, de acordo com as informações obtidas primariamente através de entrevista a sub-bacia do Boi Branco, é um recurso hídrico de uso primordialmente agrícola do qual não se retira água para abastecimento urbano. Ainda de acordo com essas informações, dentro da área da sub-bacia há um bairro que faz parte do município de Paranapanema, no qual há em torno de 60 famílias, e cada família é composta em média por 5 pessoas totalizando, portanto, aproximadamente 300 moradores que utilizam água desse recurso hídrico para abastecimento doméstico.

Segundo o Plano de Bacias do Alto Paranapanema 2012/2015, a taxa de incremento populacional para o município de Paranapanema é de 0,01353% a.a. e o consumo estimado per capita para o abastecimento público é, em média, de 0,169 m^3 $habitante^{-1}dia^{-1}$. Tomando como base esses dados para a área da sub-bacia, a demanda populacional é igual ao consumo rural, definido pela população inicial, a taxa de crescimento populacional anual e a taxa de consumo per capita por habitante por ano, conforme a Equação 12.

$$\mathrm{ConsRural} = \mathrm{PopRural} * (\mathrm{Demanda_x_hab} * 365) \qquad \textbf{(12)}$$

Em que ConsRural é o consumo rural; PopRural é a população rural; Demanda_x_hab é a demanda per capita por habitante por dia e 365 para transformar o consumo per capita por dia para consumo anual.

A população rural foi estimada pela Equação 13:

$$\mathrm{PopRural(t)} = \mathrm{PopRural(t - dt)} + (\mathrm{IncPopRural}) * \mathrm{dt} \qquad \textbf{(13)}$$

Em que PopRural (t) é a população rural no ano t; PopRural (t-dt) é a população rural no ano t-dt; IncPopRural é o incremento populacional rural no ano t.

b.3) Demanda ambiental de água

Vazão ecológica é a vazão mínima que deve ser garantida nas calhas dos rios após as retiradas dos volumes outorgados, de maneira a assegurar a manutenção e conservação dos ecossistemas aquáticos naturais (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2010).

No caso da vazão ecológica, foram revisadas diversas metodologias para definir o valor a ser usado na simulação. Optou-se por usar no cenário MRH-BB a que proporcionava a menor vazão ecológica, já que o processo para encontrar um valor que permita melhorar o habitat do rio compete ao CBH-ALPA até que exista legislação pertinente. Para simular cenários com situações extremas de demanda hídrica aplicou-se o método utilizado na França para esquemas existentes (ACREMAN; DUNBAR, 2004; SOUCHON; KEITH, 2001), então utilizou-se 1/40 e 1/10 do valor da vazão média plurianual.

b.4) Índice de Sustentabilidade (IS)

O índice de sustentabilidade (IS) é definido como a relação entre um possível déficit de água em relação à oferta correspondente na mesma região (ORELLANA-GONZÁLEZ, 2006; SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2009). Segundo esses autores, esse índice foi proposto por Xu et al.em 2002, obedecendo aos seguintes parâmetros:

$$IS = \begin{cases} (OA - DA)/OA; & OA > DA \\ 0; & OA \leq DA \end{cases}$$

Nesse trabalho esse índice foi descrito pela Equação 14:

$$\mathrm{IS} = \frac{\text{Água Estoque}}{\text{Oferta}} \qquad \textbf{(14)}$$

Onde: Água Estoque é a água disponível depois de garantidas as demandas; Oferta é a oferta total disponível de água. Se o valor de IS é maior a 0,2 isso indica um baixo ou nenhum estreses na oferta de água, o que implica que a demanda de água é menor

ou igual a 80% da oferta potencial de água. Valores menores a 0,2 refletem condições de vulnerabilidade, o que supõe que a demanda de água é maior a 80% da oferta potencial de água. Valores iguais a zero indicam que a oferta de água é insustentável o que sugere que a demanda de agua é igual, ou excede a toda a disponibilidade dos recursos hídricos locais.

De posse do modelo de estoques e fluxos assim como das equações geradas e descritas anteriormente realizou-se a simulação de três cenários para um período de 10 anos, a saber, de 2011 a 2021. Para os trabalhos sobre o impacto no uso da água na sub-bacia do Córrego Boi Branco foram utilizados índices que relacionam: disponibilidade de água, uso da água pelos diversos consumidores, níveis prováveis de precipitação pluviométrica de 75% e 50% de probabilidade, a evapotranspiração potencial calculada para a área e em relação à eficiência do sistema de irrigação, os valores usados foram de 70%, 75%, 80%, 85% e 90% de acordo com Mendonza e Frizzone (2012). No segundo cenário, considerou-se a vazão ecológica equivalente a 0,014 m^3s^{-1} (1/40 da vazão média plurianual) e 0,055 m^3s^{-1} (1/10 da vazão média plurianual) (Souchon e Keith 2001). No terceiro e último cenário, efetuou-se a simulação em função do comportamento anual da precipitação considerando os dez primeiros anos da série de dados pluviométricos utilizada nessa pesquisa, para isso, manteve-se constante a vazão ecológica equivalente a 434.408 m^3ano^{-1} (1/40 da vazão média plurianual) e a eficiência do sistema de irrigação em 90%.

Para melhor visualização os dados utilizados como entrada para "alimentar" o modelo de estoque e fluxo encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados utilizados como entrada no modelo de estoque e fluxo.

Variáveis utilizadas	Valores
Área Irrigada	20,09 km^2
Consumo médio anual de água das culturas	525 mm
Vazão média plurianual	0,551m^3 s^{-1}
Precipitação média anual	13.299,2 m^3 ha^{-1}
Evapotranspiração potencial média anual	1.070,4 mm
População rural	300 pessoas
Taxa de crescimento populacional anual	0,01353%
Eficiência do sistema de irrigação	70%, 75%, 80%, 85% e 90%
Vazão ambiental	1/40 e 1/10 da vazão média plurianual
Precipitação com probabilidade de ocorrência	75% e 50%

Fonte: AUTORA

De posse do modelo de estoque e fluxo e dos dados de entrada efetuou-se as simulações. A maneira como os cenários foram simulados está representado didaticamente nas Figuras 16 e 17.

5.9.6 Construção dos Cenários

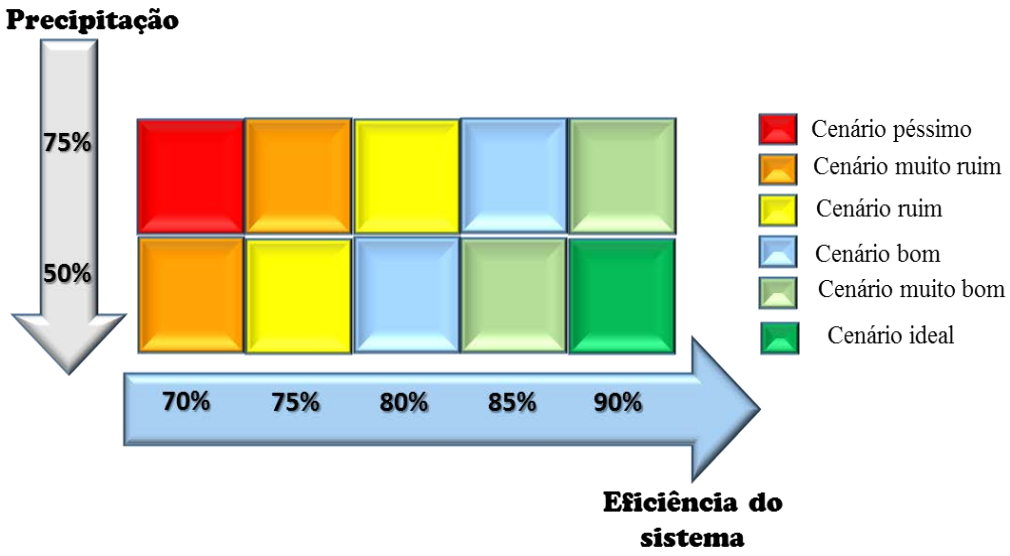

Figura 16 - Cenário precipitação x eficiência do sistema de irrigação.

Fonte: AUTORA

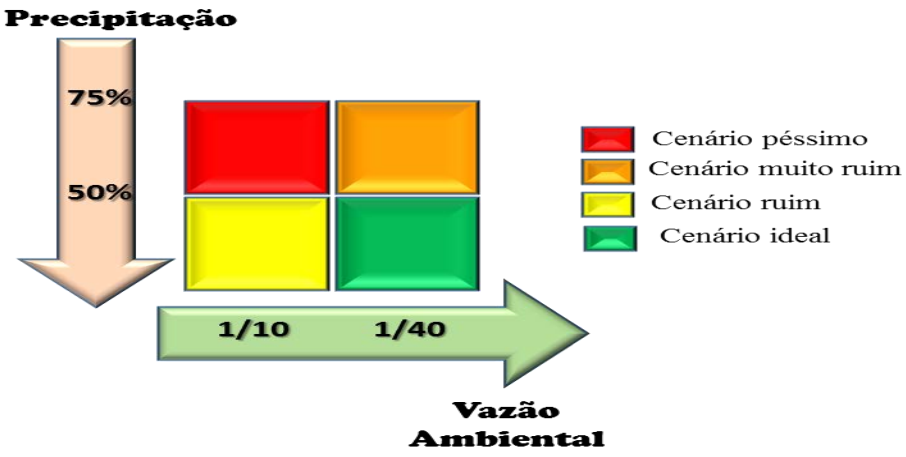

Figura 17 - Cenário precipitação x vazão ambiental.

Fonte: AUTORA

6. RESULTADOS E DISCUSÃO

6.1 Características morfológicas

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da caracterização da sub-bacia hidrográfica do córrego do Boi Branco. A área de drenagem encontrada foi de 80,71 km² e seu perímetro 41,73 km.

Tabela 7 - Características físicas da sub-bacia do córrego do Boi Branco.

Características físicas	Resultados
Área (km^2)	80,71
Perímetro (km)	41,73
Comprimento do rio principal (km)	15,78
Comprimento total dos canais (km)	87,09
Comprimento axial da bacia (km)	14,95
Índice de compacidade (Kc)	1,30
Índice de forma (Kf)	0,36
Índice de circularidade (Ic)	0,58
Ordem de ramificação	3º
Densidade de drenagem (km km^{-2})	1,08

Fonte: AUTORA

De acordo com os resultados, pode-se afirmar que a sub-bacia do córrego do Boi Branco pode ser classificada com tendência de mediana a grande para enchentes em condições normais de precipitação, uma vez que apresenta coeficiente de compacidade (Kc) distante da unidade. Em relação ao fator de forma (Kf), o valor calculado para a sub-bacia também encontra-se distante da unidade e quanto menor o Kf, mais alongada é a bacia.

Quanto mais próximo de 1 forem esses coeficientes, mais a bacia assemelha-se a um círculo, menor é o tempo de concentração das chuvas e maior a tendência de haver picos de enchentes. Isto ocorre porque há conversão do escoamento superficial, ao mesmo tempo, para um pequeno trecho do rio principal, havendo acúmulo do fluxo.

Tal fato pode ainda ser comprovado pelo índice de circularidade, cujo valor encontrado foi de 0,58. Desse modo, a sub-bacia em estudo pode ser classificada como sendo de forma alongada.

Arai et al. (2012) e Ferreira et al. (2010) ressaltaram que a forma da bacia influencia diretamente no tempo de concentração, isto é, no tempo necessário para que toda a água contribua para a sua saída após uma precipitação. De acordo com os mesmos autores, em bacias com forma circular, há maiores possibilidades de chuvas intensas ocorrerem simultaneamente em toda a sua extensão, concentrando grande volume de água no rio principal. As bacias alongadas possuem menor concentração de deflúvio.

A densidade de drenagem encontrada na sub-bacia hidrográfica córrego do Boi Branco foi de 1,08 km km^{-2}. De acordo com Villela e Mattos (1975) apud Arai et al. (2012) e Ferreira et al. (2007), a densidade de drenagem com valor até 0,5 km km^{-2}, indicam bacias com drenagem pobre enquanto que as que apresentam valores iguais ou acima de 3,5 km km^{-2}, indicam bacias bem drenadas.

Um valor baixo de densidade de drenagem representa uma resposta lenta da bacia a uma precipitação. Portanto, a bacia em estudo possui baixa capacidade de drenagem. Esse parâmetro é de grande importância, pois auxilia de forma expressiva na gestão da bacia, uma vez que indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica (ARAI et al., 2012).

Através da metodologia de Strahler (1957) e com escala de 1:50.000, verificou-se que a sub-bacia do Boi Branco é de 3º Ordem de ramificação, como pode ser visto

na Figura 18. Isso indica que o sistema de drenagem da bacia é pouco ramificado, já que possui uma área considerada grande.

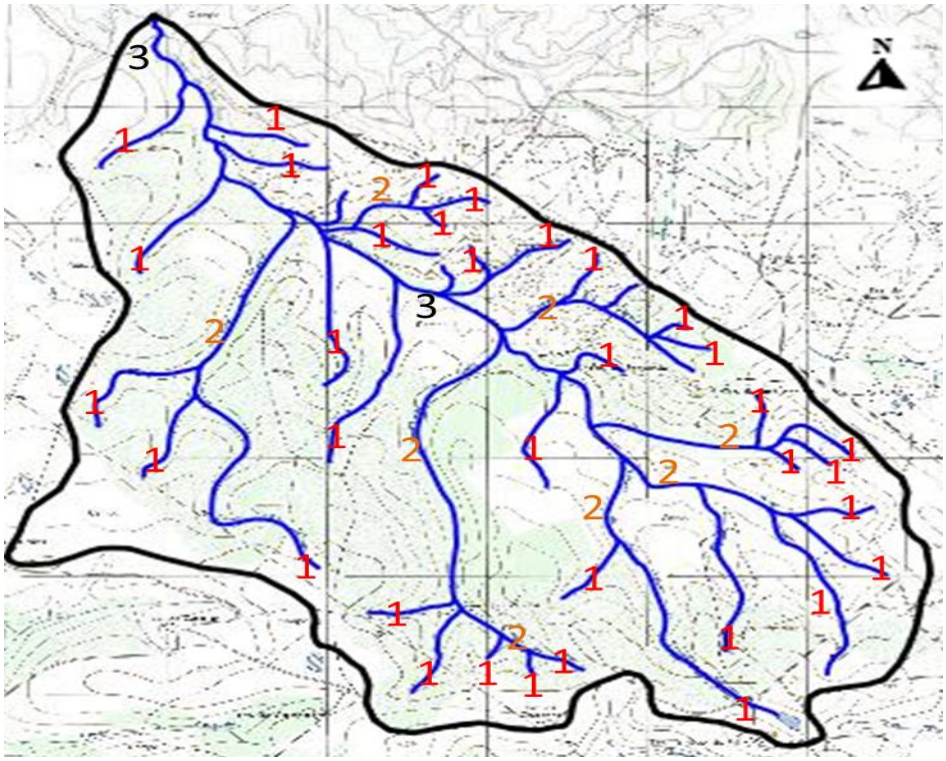

Figura 18 – Classificação dos cursos de água da rede de drenagem segundo Strahler.
Fonte: Adaptado de IBGE (1973)

Cardoso et al. (2006) e Santos et al. (2012) em seus trabalhos de caracterização morfométrica, descreveram bacias hidrográficas de 3º e de 4º Ordem, respectivamente. A área de drenagem da bacia hidrográfica trabalhada por Cardoso et al. (2006) foi igual a 9,91 km^2, e a da bacia trabalhada por Santos et al. (2012) foi igual a 143,17 km^2. Ambos afirmaram que os recursos hídricos em questão apresentaram baixo grau de ramificação por apresentarem uma área de drenagem grande.

6.2 Características de uso e ocupação do solo

Em relação à topografia, o fato da área apresentar baixa declividade é bastante pertinente, haja vista, justificar a escolha da área para a instalação dos pivôs centrais, pois, um dos critérios adotados para a escolha das áreas na qual os equipamentos são instalados, é a baixa declividade ou a ausência dela.

No que diz respeito ao uso e ocupação de solo na área da sub-bacia é possível perceber pela Figura 8 que há ocupação indevida por cultivos em áreas que correspondem à área de matas ciliares, pois estas, de acordo com o Código Florestal, Lei nº12. 651/12 compreendem a Área de Preservação Permanente (APP).

No tocante à agricultura irrigada nessa região, de 2003 a 2013 a área cultivada na região dobrou de tamanho e em 2013 o Distrito de Campos de Holambra, pertencente ao município de Paranapanema conta com aproximadamente 6 mil habitantes e abriga a maior beneficiadora de algodão da América Latina e é conhecida como a Capital da Tecnologia Agrícola (LOZANO, 2013). Por esse motivo, a demanda de água na sub-bacia do Boi Branco, segundo o DAEE, está acima de sua disponibilidade o que justifica a sua classificação como crítica.

Ainda, em relação à área cultivada dentro dos limites da sub-bacia, o fato dos agricultores cultivarem utilizando irrigação, permite que eles cultivem o ano todo culturas diferentes, uma vez que os produtores da região fazem rotação de cultura.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), as vantagens de se fazer rotação de cultura são inúmeras. Além de proporcionar a produção diversificada de alimentos e outros produtos agrícolas, quando adotada e conduzida de modo adequado e por um período suficientemente longo, essa prática melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo; auxilia no controle de plantas daninhas, doenças e pragas; repõe a matéria orgânica; protege o solo da ação dos agentes climáticos, reduz o custo das operações, proporciona maior renda e ajuda a viabilização do sistema de plantio direto e dos seus efeitos benéficos sobre a produção e sobre o ambiente de modo geral.

O plantio direto é outra prática adotada pelos produtores da área da sub-bacia. Esse tipo de manejo de solo, por manter a superfície do solo coberta por resíduos culturais proporciona ao solo redução do processo erosivo causado pelas gotas da chuva ou do

sistema de irrigação, maior disponibilidade de nutrientes às plantas, maior retenção de água, redução da temperatura do solo, estimulação da atividade biológica, aumento das taxas de infiltração, maior agregação e redistribuição dos nutrientes de maior mobilidade como nitrogênio (N), enxofre (S) e potássio (K) (HENKLAIN; MEDEIROS, 1995; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

A adoção dessas práticas pelos produtores da área da sub-bacia mostra o cuidado com o manejo do solo de modo a permitir a continuidade das atividades desenvolvidas na região de forma mais sustentada e sustentável.

Os açudes destinados à irrigação são barramentos construídos transversalmente aos cursos d'água destinados à acumulação de excedentes hídricos produzidos no período chuvoso, para que possam ser utilizados durante a estiagem. Entretanto, a construção de açudes, que na região da sub-bacia do córrego Boi Branco são fundamentais para a prática da agricultura irrigada, implica a realização de intervenções em áreas de preservação permanente (APP's) tanto no local de construção do barramento quanto nos terrenos que serão submersos. Portanto, tem-se um contrassenso, a prática da agricultura é necessária e sua realização na área da sub-bacia depende da existência de açudes que interferem em APP's, áreas essas como dito anteriormente, protegidas legalmente (ASPIPP-FEHIDRO, 2011).

Quanto ao uso agropecuário, engloba todas as coberturas naturais e antrópicas existentes na sub-bacia hidrográfica do córrego Boi Branco. A escala de mapeamento é compatível com os propósitos do estudo e da resolução da imagem, contudo, não permite contemplar toda a diversidade existente referente a pequenas propriedades ou glebas, desta forma as unidades que foram possíveis serem identificadas na referida área, foram descritas com base em visita no local e informações adquiridas com os próprios agricultores.

Nessa categoria foram inclusas: vegetação natural de porte arbóreo e capoeiras, as plantações de pinus e eucaliptos, as pastagens naturais ou cultivadas além do cultivo da cana-de-açúcar.

6.3 Pluviometria

Conforme a metodologia usada nesse trabalho, foi possível obter os resultados quantitativos dos dados utilizados nesse estudo, para o período de tempo de 1971 a 1995, tendo-se, portanto, uma série histórica de 24 anos.

Em relação ao preenchimento das falhas pluviométricas, foi realizado o preenchimento das lacunas apresentadas nas séries mensais e anuais de precipitação. A aplicação do método da ponderação regional mostrou resultados satisfatórios e consistentes estatisticamente. Os dados em negrito representam as falhas preenchidas com essa metodologia. Ao realizar esse procedimento, foi possível ter uma ideia da quantidade média de chuva que precipita sobre a área da sub-bacia. Os resultados podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 - Pluviosidade média total anual nos postos (mm).

Postos	E5-065	E5-067
1971	**899,69**	1.030,60
1972	1.404,50	1.564,20
1973	**1.293,68**	1.543,80
1974	1.490,90	1.179,10
1975	1.182,40	1.195,00
1976	1.571,20	1.374,50
1977	1.260,60	1.161,30
1978	1.129,90	1.274,00
1979	**1.080,50**	**991,49**
1980	**1.193,99**	1.250,10
1981	**1.205,75**	1.069,00
1982	1.646,70	1.523,90
1983	**1.988,32**	2.034,00
1984	1.204,80	916,50
1985	882,80	839,50
1986	1.535,70	1.527,10
1987	**1.643,06**	1.412,00

1988	1.261,80	1.483,50
1989	1.734,50	1.686,30
1990	1.356,60	1.247,60
1991	1.508,10	1.817,60
1992	1.526,10	1.470,60
1993	1.568,60	1.299,70
1994	**1.489,20**	1.188,50
1995	**642,60**	1.612,40
Média	1.348,08	1.296,66

Fonte: Adaptado de DAEE (2013)

Segundo Bertoni e Tucci (2007), embora o preenchimento realizado por esse método seja simples, apresentaram algumas limitações quando cada valor é visto isoladamente. O resultado estatístico da precipitação não sofre significativamente com as limitações deste preenchimento, o valor preenchido é utilizado apenas com a finalidade de homogeneizar as séries de precipitações para a análise estatística regional.

Oliveira et al. (2010), em um estudo analisando uma série hidrológica de precipitação do estado de Goiás, realizaram análise de preenchimento de falhas empregando-se diferentes metodologias: ponderação regional, regressão linear, ponderação regional com base em regressões lineares e vetor regional. Pelos resultados obtidos, eles constataram que a metodologia da ponderação regional embora seja um método mais simples, apresentou melhor desempenho no preenchimento das falhas quando em relação aos métodos do vetor regional e ponderação regional com base em regressões lineares. Todavia, essas metodologias não podem ser empregadas sem prévia análise regional de seu desempenho.

Para analisar o grau de homogeneidade dos dados foi gerado um gráfico denominado de curva de “Dupla Massa”. De acordo com Bertoni e Tucci (2007), se a série histórica preenchida é proporcional aos observados na base de comparação, os pontos devem alinhar-se segundo uma reta. Os resultados podem ser visualizados na Figura 19.

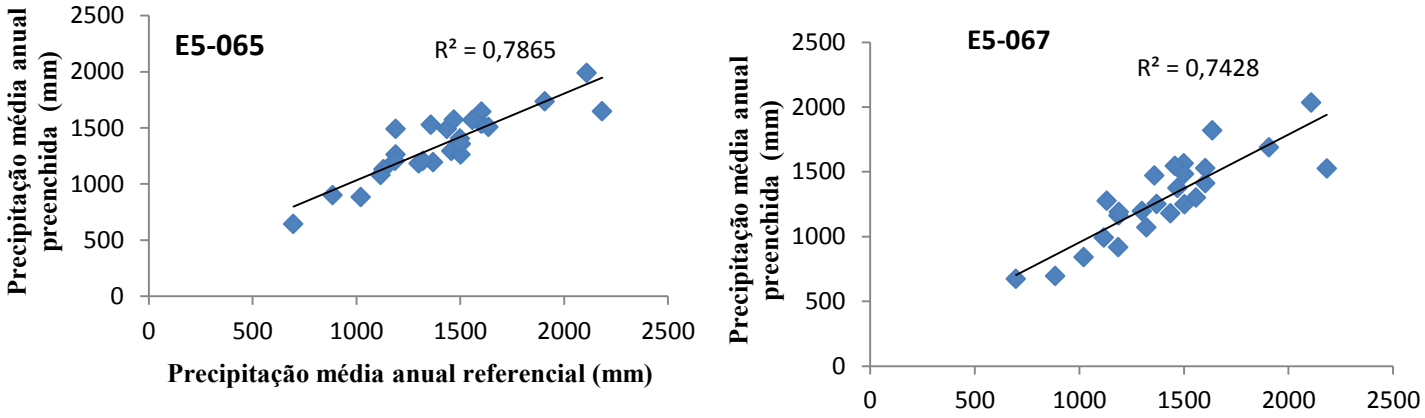

Figura 19 - Gráfico da Curva de Dupla Massa para análise de consistência dos dados.

Fonte: AUTORA

Sarmento et al. (2011), relataram que se o valor do coeficiente de determinação (R^2) for igual ou superior a 0,7 considera-se que há consistência nos dados preenchidos. A partir desse critério, conclui-se portanto que os dados preenchidos são consistentes estatisticamente, uma vez que o valor de R^2 encontrado foi igual a 0,78 e 0,74 para os postos preenchidos E5-065 e E5-067 respectivamente.

Para calcular a precipitação média numa superfície qualquer, é necessário utilizar as observações dentro dessa superfície e na sua vizinhança. Denomina-se precipitação média como sendo uma lâmina de água de altura uniforme sobre toda a área considerada, associada a um dado período de tempo, seja ele o dia mais chuvoso, o mês, ou o ano, mais chuvoso (BERTONI; TUCCI, 2007).

Em relação ao resultado da precipitação média dentro da área da sub-bacia do Boi Branco obtida aplicando-se o método dos Polígonos de Thiessen, o valor de precipitação média anual estimada foi igual a 1.329,92 mm conforme a Tabela 9. Esse valor não está de acordo com o relatório número 3 da ASPIPP-FEHIDRO (2011), pois segundo esse, os valores de precipitação média dentro da área da sub-bacia são superiores a 1.400 mm, acumulados por ano, entretanto, esse valor foi estimado levando-se em consideração os valores de precipitação de todos os postos pluviométricos e utilizando o método das isoietas.

Tabela 9 - Precipitação média na área da Sub-Bacia.

Postos	Precipitação média/posto (mm)	Área de Influencia de cada posto (km^2)	Área total da Bacia (km^2)	Precipitação média anual Thiessen (mm)
E5-065	1.348,08	52,21	80,71	1.329,92
E5-067	1.296,66	28,50		

Fonte: AUTORA

Teles et al. (2008) afirmaram que embora existam técnicas mais precisas de cálculo de precipitação média, tais como o método das isoietas e os geoestatíticos, essas, dependem de uma extensa rede de estações e, devido muitas bacias hidrográficas terem baixa densidade de estações pluviométricas, o método de Thiessen apresenta-se como alternativa viável para essas condições. Além disso, esse método permitiu uma visão da distribuição espacial das áreas de influências pluviométricas de cada estação, permitindo dessa maneira concluir que apenas 2 dos 9 postos pluviométricos citados pelo Relatório número 3 da ASPIPP-FEHIDRO contribuem efetivamente com precipitação para a área da sub-bacia, considerando-se um instrumento de análise de redes pluviométricas.

Como pode ser observada na Figura 20, a média mensal de janeiro, tido como o mês mais chuvoso é em torno de 200 mm e a média mensal de agosto, mês mais seco, em torno de 40 mm para os dois postos pluviométricos analisados (E5-065 e E5-067).

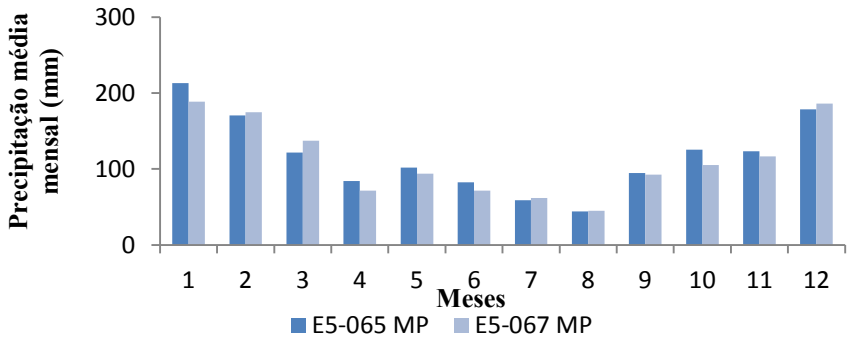

Figura 20 - Gráfico da precipitação média mensal para a área da sub-bacia do Boi Branco.
Fonte: AUTORA

Após determinar a precipitação média para a área da sub-bacia, estimou-se a precipitação com probabilidades de ocorrência utilizando o método de Kimbal, assim obteve-se as precipitações para os níveis de probabilidade de ocorrência de 75%, 50% e 25%. Anos considerados com precipitações mínimas, médios e chuvosos respectivamente, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Precipitação para os níveis de probabilidade de ocorrência para a área da sub-bacia do Boi Branco.

Precipitação com probabilidade 75% (mm)	Precipitação com probabilidade 50% (mm)	Precipitação com probabilidade 25% (mm)
1.162,40	1.327,43	1.542,74

Fonte: AUTORA

O conhecimento das precipitações prováveis é de extremo interesse para o dimensionamento de vertedouros de barragens, de canais, galerias pluviais, bueiros e barragens de abastecimento de água (VILLELA; MATTOS, 1975 apud BISPO, 2008) e para o planejamento agrícola e dimensionamento de sistema de irrigação complementar (BERNARDO et al, 2006).

De acordo com Soccol et al. (2010), o critério da precipitação provável deve ser relevante no planejamento racional de várias atividades agrícolas, uma vez que, conhecendo-se a precipitação pluvial mínima possível de ocorrer na região, pode-se realizar um planejamento eficiente de irrigações suplementares e a otimização da água disponível, permitindo assim que o agricultor tome decisões mais confiáveis.

Segundo Castro et al. (1994) apud Bispo (2008), utiliza-se no Brasil a precipitação média no dimensionamento de projetos de irrigação, o que constitui um risco para o produtor, haja vista que, essa prática faz com que os sistemas sejam superdimensionados. Sediyama (1992) apud Soccol et al. (2010) propuseram como critério para a determinação da precipitação provável ou dependente, para efeito de dimensionamento de projetos de irrigação, aquele dado pelo nível de probabilidade de 75%; este nível representa a quantidade mínima de

precipitação com probabilidade de ocorrência, ou seja, a precipitação mínima que se espera ocorrer em três de cada quatro anos.

Conforme Bernardo et al. (2006), para minimização dos riscos em projetos de irrigação suplementar, não se deve trabalhar com probabilidades de ocorrência de chuva inferiores, aos níveis de 75% ou 80%. Porém, esses valores podem ser variáveis adotando-se um critério econômico, cujo nível de probabilidade esteja associando à redução na qualidade e quantidade de produção, decorrentes da deficiência hídrica pela falta de chuva, durante determinado período (JENSEN, 1983 apud BISPO, 2008).

Bispo (2008), Soccol et al. (2010), Sarmento et al. (2011) e Lima et al. (2012) utilizaram em seus trabalhos o método de Kimbal para estimar precipitações com níveis de probabilidade, isso mostra que essa metodologia é bastante relevante em trabalhos desse tipo. Isso é possível devido tratar-se de uma metodologia simples de ser aplicada, no entanto Bispo (2008) afirmou que a única limitação desse método é a dependência de uma série de dados relativamente grande, para que os dados sejam consistentes.

Tendo conhecimento dessas informações referente à precipitação pluvial, acrescidas dos conhecimentos fenológicos de cada cultura é possível realizar um planejamento mais eficiente do manejo de irrigação, adequando o ciclo da cultura aos períodos mais favoráveis ao seu pleno desenvolvimento como a época de semeadura, conhecimento de períodos de estiagem prolongados visando amenizar o déficit hídrico e, consequentemente, perdas na produtividade agrícola (BISPO, 2008).

6.4 Validação do modelo (Etapa de exploração)

A validação de um modelo em DS tem como finalidade fundamental estabelecer a funcionalidade estrutural do modelo em relação aos objetivos para o qual foi construído. Este etapa é determinante, pois o propósito de um estudo efetuado dentro da ótica de DS é servir de base para a avaliação de diferentes estratégias e políticas que permitam melhorar o desempenho do sistema. Aprimorar o comportamento de um sistema, só tem sentido se houver confiança na estrutura do modelo. Após a construção do modelo devem-se efetuar testes de validação, cuja ênfase deve estar prioritariamente orientada aos padrões de

prognóstico, mais do que a resultados precisos, principalmente quando trata-se de modelos desenhados para mostrar uma visão de longo prazo do comportamento dos sistemas estudados (BARLAS, 1996 apud ORELLANA-GONZÁLEZ, 2006).

A calibração do modelo faz-se necessária em DS para detectar possíveis falhas no modelo construído, caso contrário, os resultados encontrados durante a simulação podem diferir muito da realidade o que torna questionável a sua utilização como instrumento de avalição.

Nesse trabalho a validação do modelo foi realizada comparando o resultado do crescimento populacional encontrado durante a simulação feita no programa Stella e o cálculo feito no programa Excel. Os resultados obtidos por ambos os programas não diferem quantitativamente entre si, o que garante o bom funcionamento do modelo idealizado para a sub-bacia do córrego do Boi Branco, como pode ser visto na Figura 21.

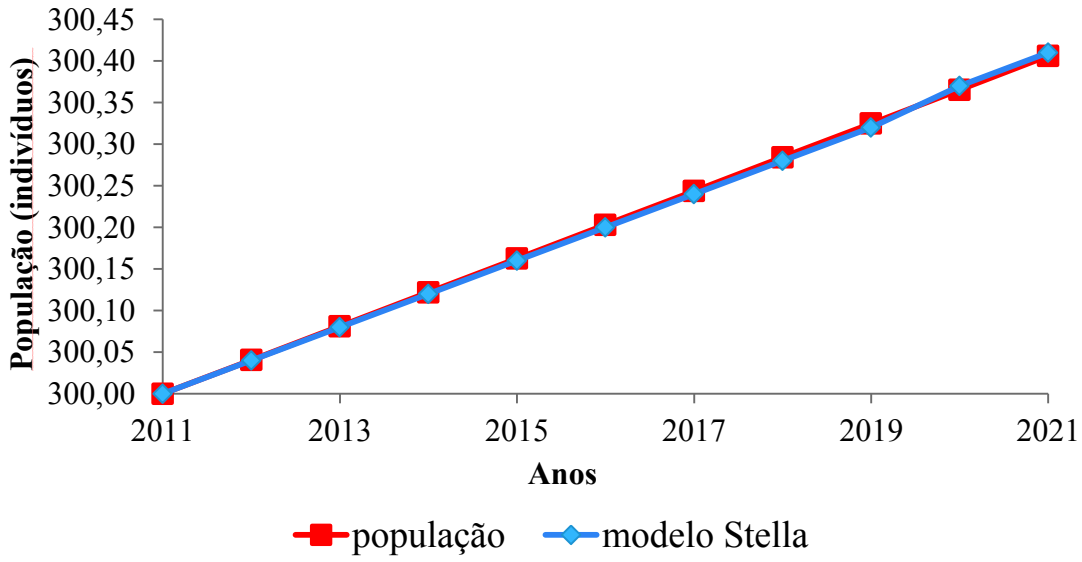

Figura 21 - Crescimento populacional para a área da sub-bacia do córrego do Boi Branco para o período de 2011 a 2021 calculado pelo modelo no programa Stella e pelo programa Excel.

6.5 Resultados das Simulações

A partir dos dados adquiridos para a referida sub-bacia, foram analisados 15 cenários, que compreenderão influências na demanda e na oferta de água, bem como restrições com a finalidade de se avaliar a sustentabilidade do uso do recurso "Água" na área da sub-bacia do córrego Boi branco. As simulações dos cenários foram feitos segundo o disposto na Tabela 11.

Tabela 11 – Cenários propostos e avaliados para a sub-bacia do córrego Boi Branco.

Cenários	Simulações
1	Efeitos das variáveis, precipitação com probabilidade de ocorrência de (i) 75% e (ii) 50% e interação com eficiência do sistema de irrigação de (a) 70%, (b) 75%, (c) 80%, (d) 85% e (e) 90% na disponibilidade dos recursos hídricos e no índice de sustentabilidade para a sub-bacia do Boi Branco de 2011 a 2021.
2	Efeito da precipitação com probabilidade de ocorrência de (i) 75% e (ii) 50% e da vazão ecológica de (f) 1/40 e (g) 1/10 na disponibilidade do recurso hídrico e no índice de sustentabilidade para a sub-bacia do Boi Branco de 2011 a 2021.
3	Simulação do comportamento do recurso hídrico e do índice de sustentabilidade considerando o comportamento da precipitação anual para o período de 2011 a 2021 igual ao da série de 1971 a 1980.

Fonte: AUTORA

6.5.1 Cenário 1: Efeitos das variáveis, precipitação com probabilidade de ocorrência de (i) 75% e (ii) 50% e interação com eficiência do sistema de irrigação de (a) 70%, (b) 75%, (c) 80%, (d) 85% e (e) 90% na disponibilidade dos recursos hídricos e no índice de sustentabilidade para a sub-bacia do Boi Branco de 2011 a 2021.

Na primeira etapa efetuou-se a simulação do cenário 1, que compreende o fator de variabilidade climático para efeito de dimensionamento de projetos de irrigação, dado pelos níveis de precipitação com probabilidade de 75% e 50%. O nível de 75% representa a quantidade mínima de precipitação com probabilidade de ocorrência, ou seja, a precipitação mínima que se espera ocorrer em três de cada quatro anos e 50% representa anos considerados com maior probabilidade de precipitação provável. Ambos associados à eficiência do sistema de irrigação variando de 70%,75%, 80%, 85% e 90%, segundo Bernardo et al. (2006) e Mendonza e Frizzone (2012), uma vez que esses autores consideram adequado o valor de eficiência do sistema de irrigação para pivô central igual ou superior a 80%. O resultado da simulação do cenário 1 em relação a demanda de água, pode ser visto na Figura 22.

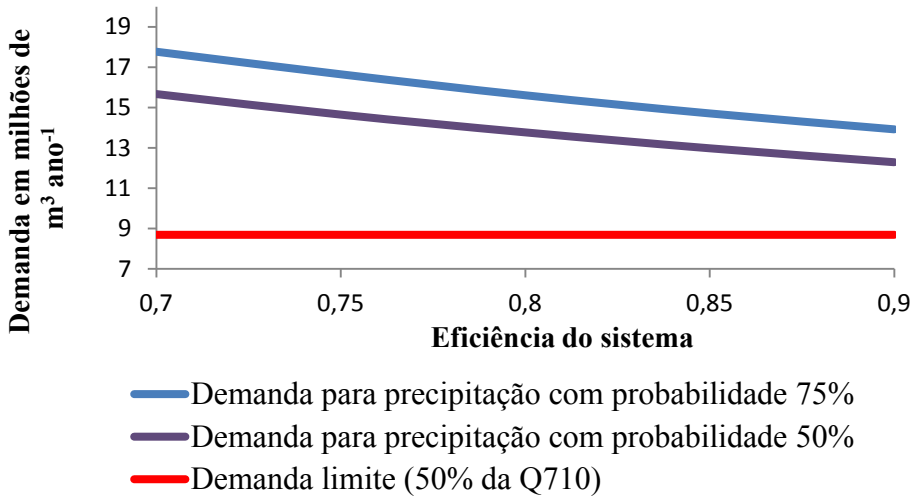

Figura 22 - Demanda total de água para precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função das eficiências do sistema de irrigação.

Fonte: AUTORA

Para a precipitação com probabilidade de ocorrência de 75% a quantidade de água ofertada é de aproximadamente 26,71 milhões de m^3ano^{-1} e para a precipitação com probabilidade de ocorrência de 50% a quantidade é de 28 milhões de m^3ano^1. Através da Figura 22 é possível notar que a quantidade de água demandada para a precipitação com probabilidade de ocorrência a nível de 75% é maior que para a precipitação com probabilidade de ocorrência a 50%, isso ocorre devido a precipitação com probabilidade de ocorrência de 75% representar a situação climática crítica para áreas cultivadas fazendo com que seja necessário aumentar o suprimento de água via irrigação.

De acordo com o gráfico, percebe-se também que à medida que a eficiência do sistema de irrigação aumenta, menor é quantidade de água demandada, o que nos mostra que se houver uma melhoria na eficiência do sistema de irrigação a quantidade de água demandada diminui, o que implica dizer que adotando-se boas práticas de manejo dos sistemas de irrigação, é possível diminuir o consumo de água. Levando-se em consideração o artigo 14 da Lei Estadual nº 9.034, de 27 de dezembro de 1994, esse recurso hídrico é considerado como de situação crítica, pois o consumo é superior a 50% da vazão de referência mostrando, portanto, que a exploração do mesmo é de forma insustentável, como está evidenciado também no gráfico de demanda agrícola na Figura 23.

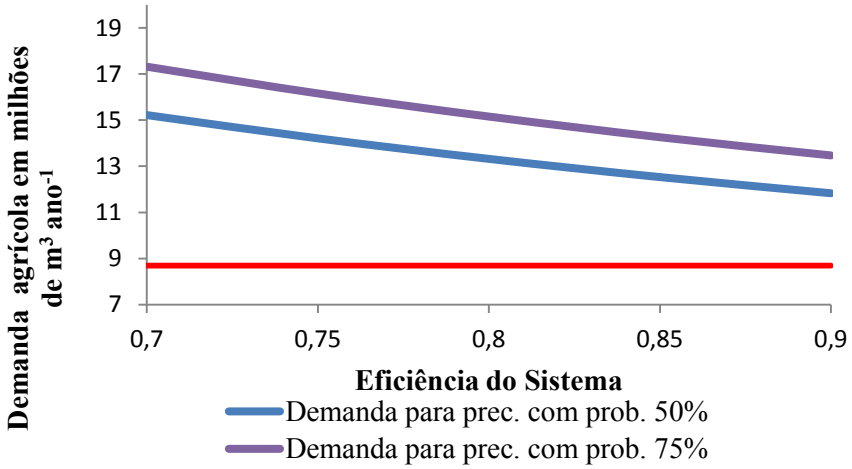

Figura 23 - Demanda agrícola para precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função das eficiências do sistema de irrigação.

Fonte: AUTORA

Através da Figura 22 e da Figura 23 é possível observar que a demanda agrícola é praticamente igual à demanda total, sendo desprezível, portanto, a demanda populacional e ambiental, confirmando assim a informação de que o consumo de água na sub-bacia do córrego Boi Branco é fundamentalmente agrícola.

A Figura 24 e a Figura 25 mostram a trajetória do Índice de Sustentabilidade. Como especificou-se na seção 5.5.2.1 do presente estudo, se o valor de IS é maior a 0,2 indica um baixo ou nenhum estreses na oferta de água.

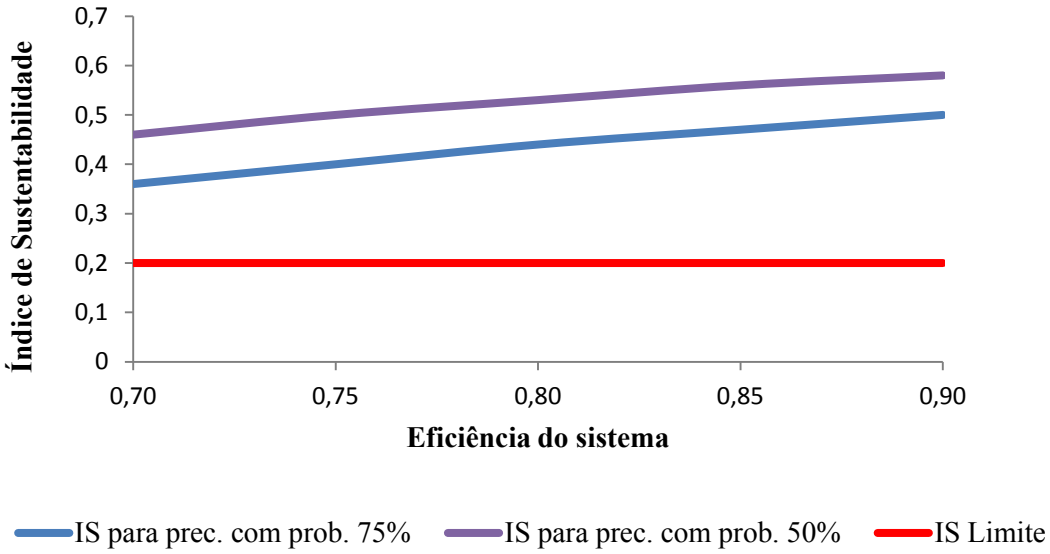

Figura 24 – Índice de Sustentabilidade global projetado para o período de 2011 a 2021.
Fonte: AUTORA

Em relação ao IS global, para ambas precipitações com probabilidade de ocorrência, assim como, para todos os valores de eficiência do sistema de irrigação utilizados para efetuar-se as simulações nesse trabalho, observa-se que o IS para a precipitação com probabilidade de 50% é melhor que o da precipitação com probabilidade de 75% e para ambas, esse índice permanece maior que o valor de referência, o que indica que há quantidade de água suficiente na sub-bacia, para atender as necessidades hídricas da agricultura, logo, a atividade agrícola estaria sendo desenvolvida de modo sustentável, sem oferecer riscos, portanto, ao recurso hídrico da sub-bacia do córrego do Boi Branco.

O IS variando de 0,38 a 0,43 para a precipitação de 75% e de 0,46 a 0,58 para a de 50% indica a utilização de 57% e 42%, respectivamente, da água disponibilizada pela sub-bacia do córrego do Boi Branco, portanto, o recurso hídrico estaria sendo explorado de forma sustentável. Vale lembrar que o IS global foi calculado referente à oferta de água total para o MRH-BB a qual, é igual à soma da água superficial com a água subterrânea. Sabe-se que na área da sub-bacia, a captação é estritamente superficial, por essa razão, a análise mais compatível com a realidade é a observada na Figura 25.

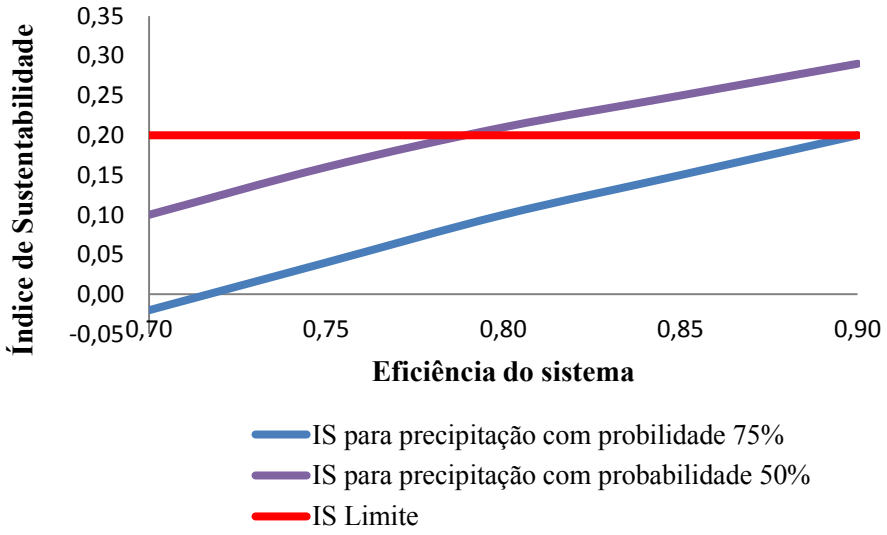

Figura 25 – Índice de Sustentabilidade para águas superficiais projetado de 2011 a 2021.
Fonte: AUTORA

Ao analisarmos o IS em detrimento somente do volume de água superficial que é igual a 17.376.336 m^3ano^{-1}, pode-se inferir que esse cenário não é sustentável, uma vez que para a precipitação com probabilidade de 75% não há influência da eficiência do sistema de irrigação, pois, não importa qual valor os agricultores adotem, o IS continuará abaixo do valor limite de 0,2, refletindo em condições de vulnerabilidade dos recursos hídricos, o que pressupõe-se que a demanda de água é maior a 80% da oferta potencial de água. Já para a precipitação com probabilidade de 50% a atividade agrícola só será sustentável caso a eficiência do sistema utilizado nos equipamentos de irrigação seja igual ou maior a 80%, caso contrário, pode-se afirmar que a atividade agrícola utilizando irrigação na sub-bacia do Boi Branco, é totalmente insustentável em condições climáticas adversas.

Desta maneira, a sustentabilidade na área da sub-bacia do Boi Branco só será possível, sem depender dos fatores climáticos, provavelmente se os agricultores passarem a perfurar e a explorar as águas subterrâneas para complementar a captação superficial com a finalidade de fazer irrigação.

6.5.2 Cenário 2: Efeito da precipitação com probabilidade de ocorrência de (i) 75% e (ii) 50% e da vazão ecológica de (f) 1/40 e (g) 1/10 na disponibilidade do recurso hídrico e no índice de sustentabilidade para a sub-bacia do Boi Branco de 2011 a 2021.

Na segunda etapa efetuou-se a simulação dos cenários em função das precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% juntamente com os parâmetros de vazão ecológica segundo Souchon e Keith (2001). Para isso, considerou-se a vazão ecológica equivalente a 434.408 m^3ano^{-1} (1/40 da vazão média plurianual) e 1.737.633 m^3ano^{-1} (1/10 da vazão média plurianual) e manteve-se a eficiência do sistema de 90% em todas as simulações. O resultado da simulação do cenário 2, para demanda total de água pode ser visto na Figura 26.

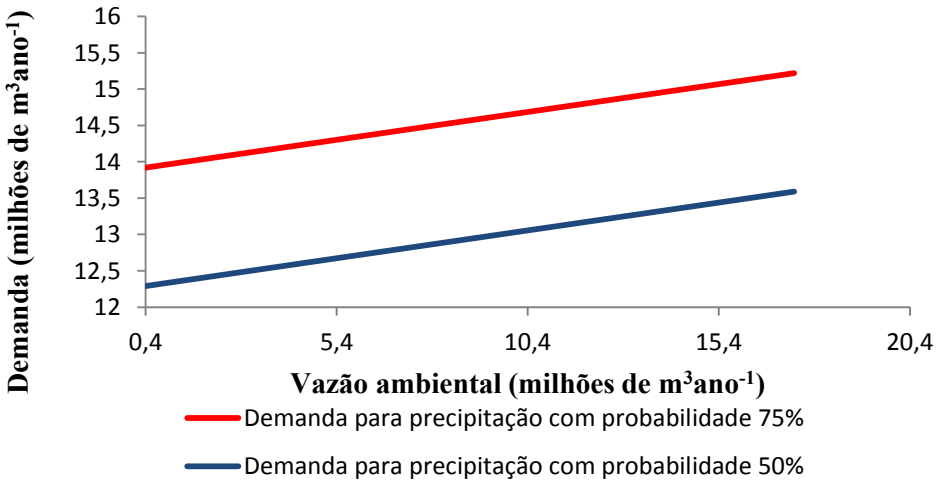

Figura 26 - Demanda total de água para precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função da vazão ambiental de 1/40 e 1/10.

Fonte: AUTORA

Para esse cenário, a quantidade de água ofertada é em torno de 26,7 milhões de m^3ano^{-1} e a demanda média é aproximadamente a 14,5 milhões de m^3ano^{-1} para a precipitação com probabilidade de 75%, já para a precipitação com probabilidade de 50% a demandada média é igual a 12,9 milhões de m^3ano^{-1} para o período de tempo de 2011 a 2021. Através da Figura 25, é possível observar que para a precipitação com probabilidade de 50% a demanda é menor do que para a precipitação com probabilidade de 75%, isso pode ser explicado devido ao maior volume de precipitação garantir a suplementação de água para as culturas, diminuindo assim a necessidade de se fazer a irrigação na área.

Na Figura 27 observa-se que a demanda agrícola permanece constante para ambas as precipitações com probabilidade de ocorrência e assim como na demanda total, para a precipitação com probabilidade de ocorrência de 50% a quantidade demandada é menor do que para a precipitação com probabilidade de 75%. É possível constatar também que para essa variável, não há influência da demanda da vazão ambiental.

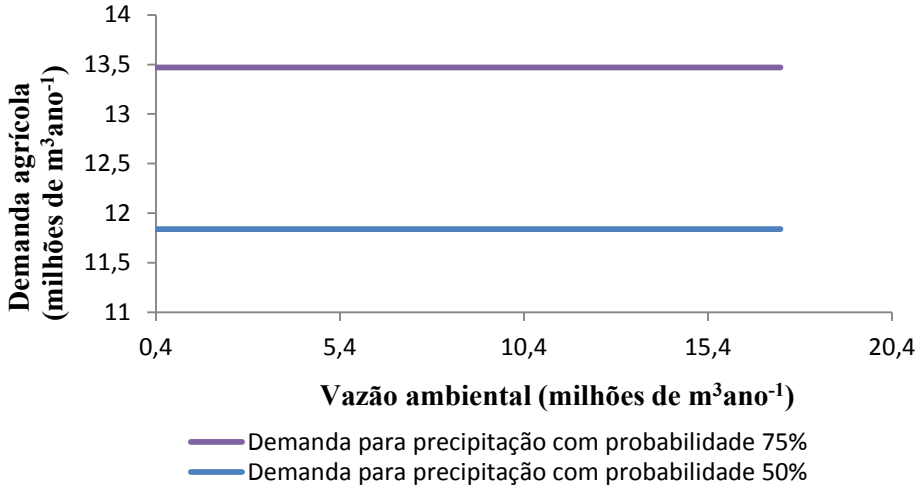

Figura 27 - Demanda agrícola para precipitações com probabilidade de ocorrência de 75% e 50% em função da vazão ambiental de 1/40 e 1/10.

Fonte: AUTORA

Quanto ao IS global, para ambas precipitações com probabilidade de ocorrência, assim como, para ambos valores de demanda da vazão ambiental utilizados nessa pesquisa, observa-se que o IS para a precipitação com probabilidade de 50% é melhor que o

da precipitação com probabilidade de 75% e que para as duas precipitações com probabilidade de ocorrência o IS permanece acima do valor limite de 0,2, dessa maneira, há quantidade de água suficiente na sub-bacia para atender as necessidades hídricas da agricultura, logo, a atividade agrícola estaria sendo desenvolvida de modo sustentável, sem oferecer riscos ao recurso hídrico da sub-bacia do córrego do Boi Branco, conforme ao observado na Figura 28.

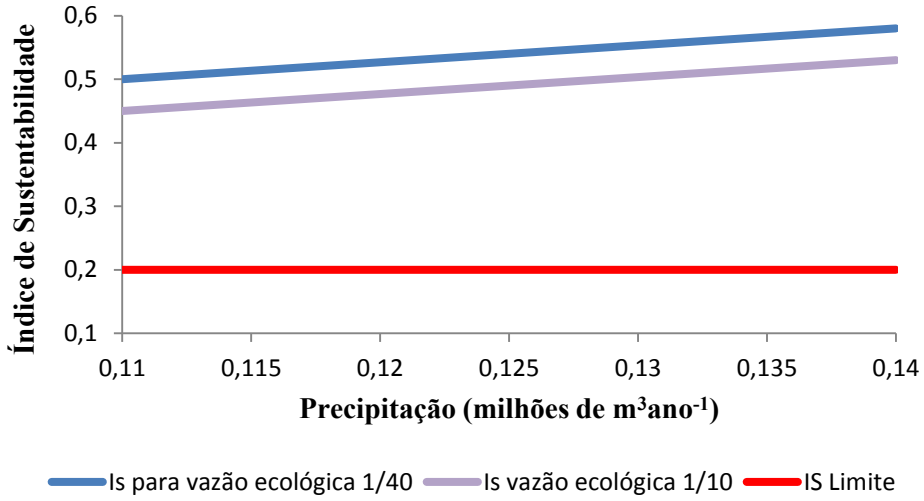

Figura 28 – Índice de Sustentabilidade global para vazão ambiental de 1/40 e 1/10 projetado para o período de 2011 a 2021.
Fonte: AUTORA

O IS variando de 0,50 a 0,58 para a vazão de 1/40 e de 0,45 a 0,53 para a vazão de 1/10 indicam que se estar utilizando em torno de 46% e 51% respectivamente da água disponibilizada pela sub-bacia do córrego do Boi Branco, o que indica um baixo ou nenhum estresse na oferta potencial de água. Para o IS correspondente a água superficial, condição que corresponde a situação real na área da sub-bacia do córrego Boi Branco, o resultado pode ser a visualizado na Figura 29.

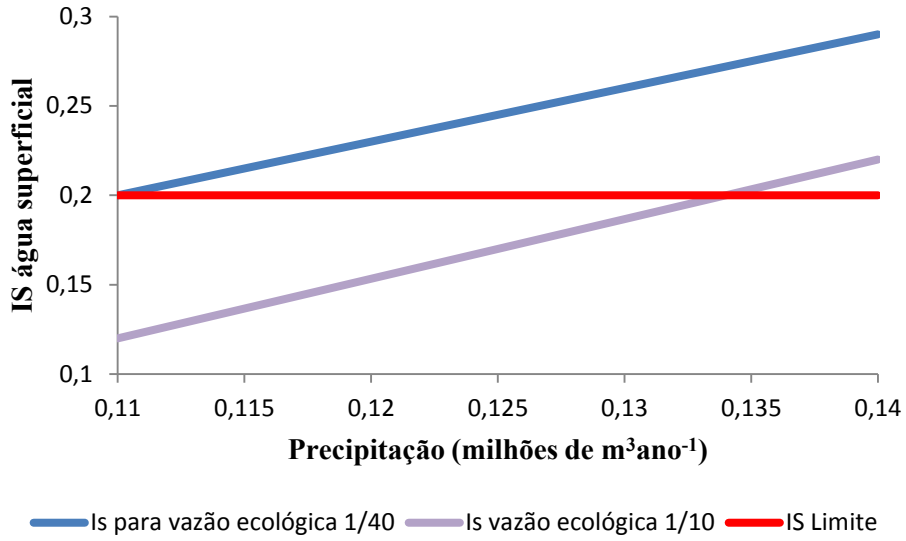

Figura 29 – Índice de Sustentabilidade para águas superficiais para vazão ambiental de 1/40 e 1/10 projetado de 2011 a 2021.
Fonte: AUTORA

Ao avaliarmos o IS em função do volume de água superficial que é aproximadamente igual a 17,3 milhões de m^3ano^{-1}, pode-se concluir que esse cenário não é sustentável, uma vez que para a vazão ambiental de 1/40 nota-se que o IS no início já é igual ao valor de referência de 0,2, mas, posteriormente, permanece com valores superiores à esse, indicando que a atividade agrícola seria totalmente sustentável, causando apenas um baixo estresse na oferta de água. Todavia, para a vazão ambiental de 1/10 percebe-se que há condições de vulnerabilidade e que o recurso hídrico está sendo explorado de maneira insustentável, uma vez que, o IS permanece abaixo do valor de referência praticamente durante toda a simulação, deste modo, supõe-se que a demanda de água é maior a 80% da oferta.

Portanto, nota-se que o IS para a vazão de 1/40 é superior para ambos os cenários climáticos, logo, essa vazão poderia ser utilizada como base para o processo de gestão, tendo em vista o uso múltiplo das águas, uma vez que representa uma condição apropriada de garantia quantitativa, contribuindo assim para a sustentabilidade na área da sub-bacia.

Desta forma, quando se considera a precipitação associada com a demanda da vazão ambiental , os melhores resultados obtidos são aqueles para precipitação de 50% (0,13 milhões de m^3ano^{-1}), em função da demanda da vazão ambiental de 1/40, o que mostra a importância da vazão ecológica no manejo de recursos hídricos.

6.5.3 Cenário 3: Simulação do comportamento do recurso hídrico e do índice de sustentabilidade considerando o comportamento da precipitação para o período de 2011 a 2021 igual ao da série de 1971 a 1980.

Na terceira e última fase, efetuou-se a simulação dos cenários em função do comportamento anual da precipitação, considerando os dez primeiros anos da série de dados pluviométricos utilizada nessa pesquisa. Para isso, considerou-se a vazão ecológica equivalente a 434.408 m^3ano^{-1} (1/40 da vazão média plurianual) e manteve-se a eficiência do sistema de irrigação em 90%. O resultado da simulação do cenário 3 para oferta e demanda total de água pode ser visto na Figura 30.

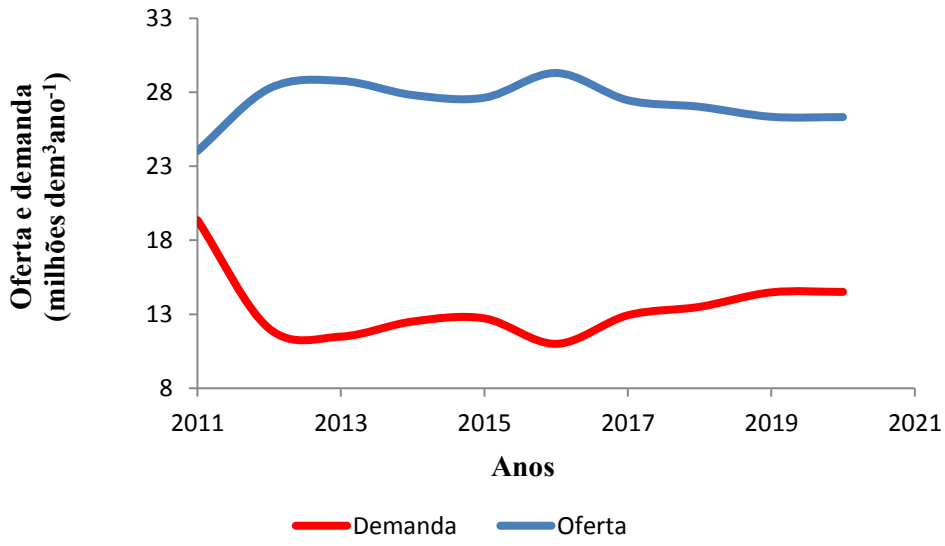

Figura 30 - Oferta total e demanda total e água.

Fonte: AUTORA

No que diz respeito à oferta e a demanda total de água para esse cenário, verifica-se que a quantidade máxima demandada é aproximadamente igual a 20 milhões de m^3ano^{-1} para o ano de 2011 e a mínima é igual a 11 milhões de m^3ano^{-1} para o ano de 2016.

Nota-se ainda que para todo o período, a quantidade de água demandada permanece menor que a oferta, o que indica que a sub-bacia teria água suficiente para dar suporte à atividade agrícola irrigada, logo, a sub-bacia do córrego do Boi Branco não poderia ser classificada como crítica pelo DAEE, pois não se enquadraria no artigo 14 da Lei 9.034.

Entretanto, ao relacionar-se somente a oferta de água superficial com a demanda para esse cenário, conforme a (Figura 31) nota-se que a demanda para o ano de 2011 é igual à aproximadamente 19,5 milhões de m^3ano^{-1}, enquanto que a oferta é igual a aproximadamente 17,5 milhões de m^3ano^{-1}, portanto a demanda é maior que a oferta em 2 milhões de m^3ano^{-1} o que representa 1,11%.

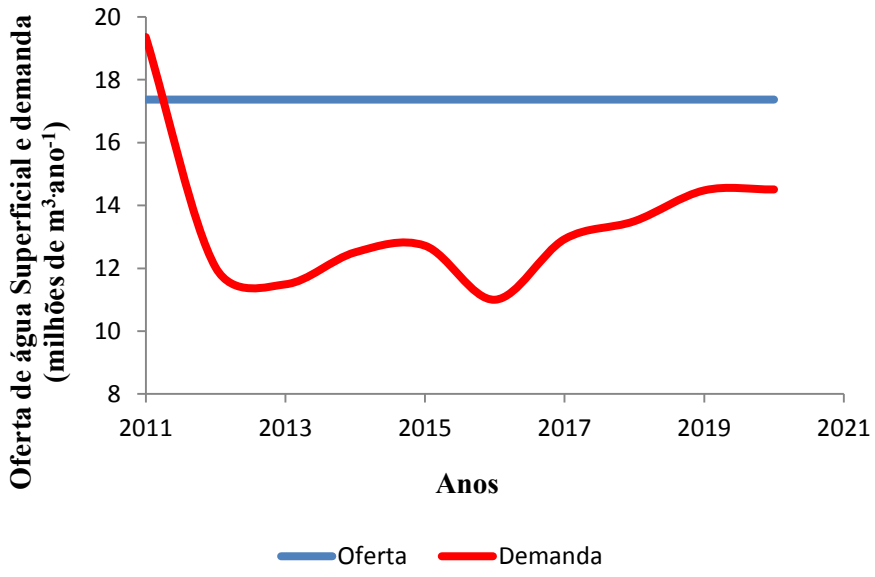

Figura 31 - Oferta de água superficial e demanda total.

Fonte: AUTORA

Verifica-se ainda, que a demanda varia de acordo com o ano, o que pode ser explicado devido ao volume de precipitação na área da sub-bacia, haja vista que, para a série de dados há anos com maior e menor volume de precipitação. Para os anos mais chuvosos, o suprimento de água para as culturas via irrigação é pouco ou até mesmo desnecessário o que diminui a demanda de água no recurso hídrico, já para anos com baixa precipitação, faz-se necessário o suprimento de água utilizando irrigação, o que faz a demanda aumentar consequentemente.

Todavia, apesar da demanda permanecer menor que a oferta para praticamente todo o período, ela requer em média 77% da água ofertada, o que permite ao DAEE classificá-la como crítica de acordo com a legislação.

No que concerne ao IS global e ao IS para águas superficiais para esse cenário, os resultados estão expressos na Figura 32.

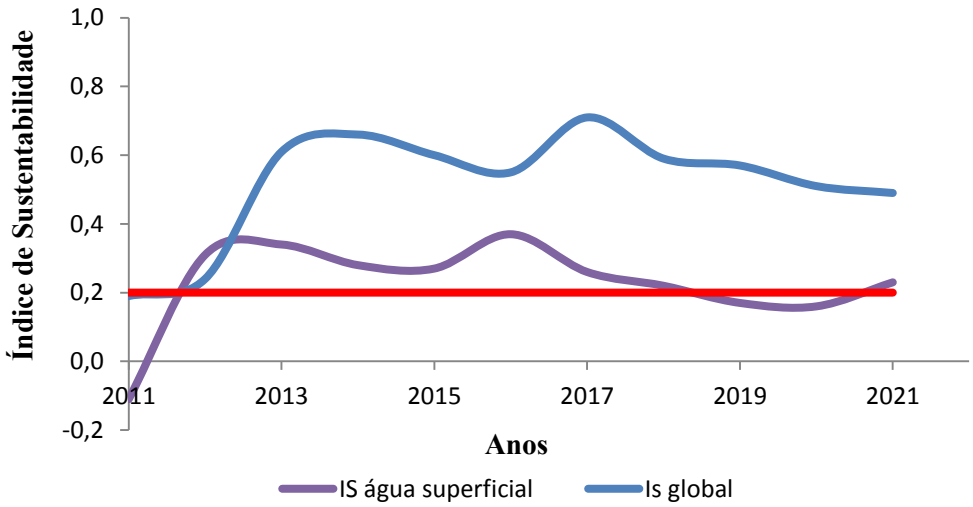

Figura 32 – Índice de Sustentabilidade global e Índice de Sustentabilidade para água superficial.

Fonte: AUTORA

Observa-se que em 2011 o IS global é igual a 0,2, o IS mínimo aceitável, e que este aumenta para o restante do período, sendo que o melhor IS global acontece no ano de 2017 com o valor igual a 0,71, nos indicando assim, que há baixo ou

nenhum estresse na oferta de água pela sub-bacia do Boi Branco, uma vez que a demanda é menor que a oferta potencial do recurso hídrico.

Porém, ao analisarmos o IS para o volume de água superficial verifica-se que para o primeiro ano está bem abaixo do IS de referência 0,2, mas, a partir do ano de 2012 até 2018, o IS aumenta e fica acima de 0,2 mostrando que há influência da precipitação na sustentabilidade, todavia, nos anos de 2019 e 2020 o IS torna a ficar abaixo do IS mínimo e finalmente em 2021 ele aumenta e fica um pouco acima de 0,2. Para os anos com valores abaixo de 0,2 evidencia-se que há condição de vulnerabilidade, o que nos permite supor que a demanda de água é maior que 80% da oferta, já para os anos com valores de IS acima de 0,2 sugere-se que está havendo baixo ou nenhum estresse na oferta de água pela sub-bacia, uma vez que a demanda é menor ou igual 80% da oferta potencial do recurso hídrico.

Os resultados das simulações podem ser vistos nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Resultados das simulações dos cenários 1 e 2 para a sub-bacia do córrego Boi Branco de 2011 a 2021

Cenários	Oferta Total	Demanda	Oferta de Água superficial	IS Global	IS Água Superficial
	m^3				
1(i)(a)	26.714.728	17.773.948	17.376.336	0,36	-0,02
1(i)(b)		16.619.235		0,40	0,04
1(i)(c)	26.714.728	15.608.841	17.376.336	0,44	0,10
1(i)(d)		14.717.318		0,47	0,15
1(i)(e)	28.002.782	13.924.852	17.376.336	0,50	0,20
1(ii)(a)		15.221.515		0,46	0,10
1(ii)(b)	28.002.782	14.206.747	17.376.336	0,50	0,16
1(ii)(c)		13.318.826		0,53	0,21
1(ii)(d)	26.714.728	12.535.365	17.376.336	0,56	0,25
1(ii)(e)		11.838.956		0,58	0,29
2(i)(f)	26.714.728	13.924.852	17.376.336	0,50	0,20
2(i)(g)		15.228.074		0,45	0,12
2(ii)(f)	28.002.782	12.291.870	17.376.336	0,58	0,29
2(ii)(g)		13.595.114		0,53	0,22

(i)Precipitação com probabilidade de ocorrência de 75%; (ii) Precipitação com probabilidade de ocorrência de 50%; Eficiência do sistema de irrigação (a) 70%, (b) 75%, (c) 80%, (d) 85% e (e) 90% e Vazão ecológica de (f) 1/40 e (g) 1/10.

Fonte: AUTORA

Tabela 13- Resultados da simulação do cenário 3 para a sub-bacia do córrego Boi Branco de 2011 a 2021.

Cenário	Anos	Oferta Total	Demanda	Oferta de Água superficial	IS Global	IS Água Superficial
		m^3				
3	2011	24.031.282	19.357.054	17.376.336	0,19	-0,011
3	2012	28.246.732	12.026.187	17.376.336	0,24	0,31
3	2013	28.773.663	11.491.124	17.376.336	0,61	0,34
3	2014	27.807.623	12.513.373	17.376.336	0,66	0,28
3	2015	27.631.979	12.719.930	17.376.336	0,60	0,27
3	2016	29.300.594	11.003.355	17.376.336	0,55	0,37
3	2017	27.456.335	12.933.687	17.376.336	0,71	0,26
3	2018	27.017.226	13.502.145	17.376.336	0,59	0,22
3	2019	26.343.925	14.481.904	17.376.336	0,57	0,17
3	2020	26.324.409	14.512.504	17.376.336	0,51	0,16
3	2021	26.714.728	14.924.852	17.376.336	0,49	0,23

*Cenário 3: Simulação do comportamento do recurso hídrico e do índice de sustentabilidade considerando o comportamento da precipitação anual igual ao da série de 1971 a 1980. A vazão ecológica utilizada foi 1/40 da vazão média plurianual e a eficiência do sistema de irrigação foi 90%.

Fonte: AUTORA

7. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho permitem as seguintes conclusões:

1. Os resultados obtidos pelo modelo proposto são satisfatórios, mostrando que a mecânica do mesmo está adequada.

2. Quando considera-se a precipitação associada com o manejo da eficiência do sistema de irrigação, os melhores resultados obtidos são para a precipitação com probabilidade de ocorrência de 50% em função da eficiência do sistema de irrigação igual ou superior a 80% e em seguida o com precipitação de 75% e eficiência do sistema de irrigação igual a 90%.

3. A precipitação com probabilidade de ocorrência de 50% associada á vazão ecológica de 1/40 promove a diminuição da quantidade de água demandada, o que contribui para a sustentabilidade na área da sub-bacia.

4. A vazão ecológica de 1/40 poderia ser utilizada como base para o processo de gestão, tendo em vista o uso múltiplo das águas enquanto não existir legislação pertinente.

5. Considerando-se apenas a oferta de água superficial na sub-bacia do Boi Branco a atividade agrícola irrigada compromete a sustentabilidade dos recursos hídricos em todos os cenários, caso não sejam tomadas as providências necessárias.

6. A sustentabilidade dos recursos hídricos na área da sub-bacia do córrego do Boi Branco só será possível, provavelmente se os agricultores passarem a explorar de forma racional as águas subterrâneas com a finalidade de complementar a captação superficial para fazer irrigação, mantendo em equilíbrio ambas as fontes de água.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACREMAN, M.; DUNBAR, M. J. Defining enviromental river flow requirements- a review. Hydrogy & Earth System Sciences, Wallingfor, v.8, n.5, p.861-876, 2004.

ACSELRAD, H. Sustentabilidade e Articulação Territorial do Desenvolvimento Brasileiro. II Seminário Internacional sobre Desenvolvimento Regional. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional. Santa Cruz do Sul, RS. 2004.

AMORIM et al. **Uso e manejo d irrigação:** Qualidade da água na agricultura. 1. ed. Brasília-DF: Embrapa informação tecnológica, 2008. 528 p.

ANA- Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2012**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/Conjuntura2012.pdf>. Acesso em: 13 de março de 2013.

ANA - Agência Nacional de Águas (2004). Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco -PBHSF (2004-2013) - Estudo Técnico de Apoio ao PBHSF – Nº 16: Alocação de Água. Brasília – Distrito Federal. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/prhbsf/arquivos/Estudos/ET%2016%20Alocacao%20de%20Agua.p>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2014.

ANDRADE –SOSA, H. H. et al. Evolución: herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas. **Revista de Dinámica de Sistemas,** vol. 5, n. 1, p. 3-29, 2008. Disponível em: <http://dinamicasistemas.utalca.cl/6_Publicaciones/Revista/Vol5Num1/RDS_5_1_1.pdf>. Acesso em: 14 de maio de 2014.

ANGELO, C.; MELO, M.; VOMERO, M. F. A era da falta d'água**. Revista Super interessante**, ed. 154, jul. 2000. Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/era-falta-d-agua-441456.shtml>. Acesso em: 14 de maio de 2013.

APPLE. **Apple Maps.** 2013. Imagem de satélite. Disponível em: <https://www.apple.com/br/ios/maps/>. Acesso em: 10 nov. 2013.

ARAIA, E. Água doce: O ouro do século 21. **Revista Planeta,** ed. 438, mar. 2009. Disponível em: <http://revistaplaneta.terra.com.br/secao/meio-ambiente/agua-doce-o-ouro-do-seculo-21>. Acesso em: 14 de maio de 2013.

ARAI, F. K. et al. Caracterização hidromorfométrica da bacia do Dourados localizada no centro-sul do Mato Grosso do Sul. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 5, n. 17, p. 270-280, 2012.

ASPIPP-FEHIDRO. **Plano para instalação e uso sustentável de açudes em empreendimentos agrícolas na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, SP.:** RELATÓRIO TÉCNICO 112.082-205/11. 2011. Volume 3.

BANCO MUNDIAL. **Relatório sobre desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática.** São Paulo. Ed. UNESP, 2010. p. 133.

BARBOSA, G. S. da. O Desafio do Desenvolvimento Sustentável. **Revista Visões,** 4ª ed., n.4, V.1, Jan/Jun 2008. Disponível em: <http://www.controversia.com.br/uploaded/pdf/12883_o-desafio-do-desenvolvimento-sustentavel-gisele.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2013.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação.** 8. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2006. p. 9-11.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4 ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2007. p. 943.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **CONSERVAÇÃO DO SOLO.** 7. ed. SÃo Paulo: Ícone, 2010. 355 p.

BISPO, E. M. **Caracterização agroclimática e probabilidade de precipitação para região de Ilha Solteira - SP**. 2008. F. 40. Trabalho (Graduação em Engenharia Agrônoma)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2008. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/tcc_everaldo07jul08.pdf>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2014.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **GEO Brasil recursos hídricos**: componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil. Brasília: ANA; PNUMA, 2007. 264 p. (GEO Brasil Série Temática: GEO Brasil Recursos Hídricos). Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/estudos/Geo-Brasil-Recursos-Hidricos-Resumo-Executivo.pdf>. Acesso em 25 de janeiro de 2014.

BRASIL**. LEI Nº 9.433, 08 DE JANEIRO DE 1997**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/CCivil_03/Leis/L9433.htm> Acesso em: 18 de março de 2013.

CARDOSO, C. A. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista árvore,** Viçosa, MG, v. 30, n. 2, jan. / mar. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622006000200011&script=sci_arttext>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2014.

CBH-ALPA. **II Seminário sobre a implantação de cobranças no CBH-ALPA**. Disponível em: <http://www.portalideas.org.br/portal/images/pdf/Junho2012/cbhalpa.pdf>. Acesso em 04 de janeiro de 2014.

CBH-ALPA. **Plano de Bacia do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema para o período de 2012/2015**, Piraju, SP, 15 dezembro de 2011. Disponível em: <http://www.comitealpa.com/pdf/planodebaciacbhalpa.pdf>. Acesso em 04 de agosto de 2013.

CBH-ALPA. **Situação dos Recursos Hídricos do Alto Paranapanema UGRHI 14, Minuta Preliminar do Relatório Técnico Final**, Lins, SP, agost. 1999. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH ALPA/136/relalpaseg.pdf>. Acesso em 04 de janeiro de 2014.

CBH-ALPA. **Fundamentos CBH-ALPA 2012.** Disponível em: <http://www.comitealpa.com/pdf/Fundamentos_cbh_alpa.pdf>. Acesso em 06 de janeiro de 2014.

CETEC. **Minuta preliminar do relatório de situação dos recursos hídricos da UGRHRI 14.** Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH-ALPA/136/relalpaseg.pdf>. Acesso em 05 de janeiro de 2014.

CETESB. **O problema da escassez de água no mundo**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/37-O-Problema-da-Escassez-de-%C3%81gua--no-Mundo>. Acesso em 19 de março de 2013.

CMMAD - Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso futuro comum.** Rio de janeiro. Ed. Fundação Getúlio Vargas, 1988.

COSTA, A. A.V. M.R. Agricultura sustentável I: Conceitos. **Revista de Ciências Agrárias,** Lisboa, v. 33, n. 2, 2010 Disponível em: <http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?pid=S0871 018X2010000200007&script=sci_arttext>. Acesso em 29 de janeiro de 2014.

DORETTO, M. **O uso do enfoque sistêmico na sustentabilidade dos sistemas de produção: a experiência do IAPAR,** Londrina, PR, n. 16, 1998. Disponível em: <http://www.iapar.pr.gov.br/arquivos/File/uso_enf_sustem.pdf>. Acesso em 29 de janeiro de 2014.

FAO. **Statistical yearbook 2013-World food and agriculture.** Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e.PDF>. Acesso em 27 de janeiro de 2014.

FARIAS, R. A. de et al. Demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e Ambiental,** Campina Grande, PB, v. 4, n. 1, p. 46-50, 2000. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br/revista/v4n1/046.pdf>. Acesso em 27 de janeiro de 2014.

FERREIRA, C. W.S. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do açude Cachoeira II , no município de Serra Talhada - PE, Brasil. In VI Seminário Latino Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero Americano de Geografia Física, 2010, Coimbra. Disponível em: <http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema2/clarisse>. Acesso em 10 de fevereiro de 2014.

FERREIRA, D. S. et al. Utilização de dados de sensoriamento remoto para obtenção das características físicas da Bacia Hidrográfica do Córrego João Pedro em Linhares – Espírito Santo. In Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, XIII, 2007, Florianópolis. **Anais.** Florianópolis, p. 3343 a 3348. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.22.43/doc/3343-3348.pdf> Acesso em 15 de fevereiro de 2014.

FIGUEIREDO. J. C. B. de. Planejamento orientado por cenários com o uso de modelos causais lineares e diagramas de estoque e fluxo. **Revista Produção**, v. IX, n. II, 2009. Disponível em: <echnical.paper.nom.br/artigos/Planejamento%20orientado%20por%20cenários%20com%20o%20uso%20de%20modelos%20causais%20lineares%20e%20diagramas%20de%20estoque%20e%20fluxos.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2014.

FRANCHINI, J. C.; et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola no Paraná**. Londrina-PR. Embrapa Soja, 2011.

FREIRE, A.G. **Águas do Jequitinhonha**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2001.

GOULART JÚNIOR, R. et al. Estudo da disponibilidade hídrica das bacias PCJ utilizando dinâmica de Sistemas. In: ENCONTRO NACIONAL DA ECOECO, IX, 2011, Brasília. **Políticas públicas e a perspectiva da economia ecológica**. Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/ix_en/GT2-250-192 20110620183522.pdf>. Acesso em 25 de janeiro de 2014.

HENKLAIN, J. C.; MEDEIROS, G. B. de. **EVOLUÇÃO E ESTADO DA ARTE DO PLANTIO DIRETO NA AGRICULTURA.** 1995. 1º Seminário sobre Cultivo Mínimo do Solo em Florestas. p. 1-7. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/seminario_cultivo_minimo/cap01.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2014.

HORTON, R. **Desenvolvimento Erosional de fluxos e as suas bacias de drenagem:. abordagem hidrophysical para morfologia quatitative**. New York: Geological Society of Boletim americano de 1945, v.56. p. 807-813.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da população residente nos estados brasileiros no ano de 2013**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=sp>. Acesso em 25 de janeiro de 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cartas cartográficas:** Jurumirim e Guarizinho. 1973. Escala 1:50000. Disponível em: <http://loja.ibge.gov.br/cartas-mapas-e-cartogramas.html?p=27>. Acesso em: 12 jun. 2013.
INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=12563>. Acesso em 25 de março de 2013.

IRRIGATION and water use. United States Department of Agriculture. 2012. Disponível em: <http://webarchives.cdlib.org/sw1rf5mh0k/http://www.ers.usda.gov/Briefing/WaterUse/>. Acesso em 25 de janeiro de 2014.

KAMIYAMA, A. **Agricultura sustentável.** Cadernos de educação ambiental 13. São Paulo, 2011.

LAYRARGUES, P. P. Do Ecodesenvolvimento ao Desenvolvimento Sustentável: Evolução de um Conceito. **Revista proposta**, v. 71, p. 4, 1997. Disponível em: <http://material.nerea-investiga.org/publicacoes/user_35/FICH_ES_32.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2013.

LEI 9.034, DE 27 DE DEZEMBRO DE 1994. **Legislação estadual de Recursos Hídricos.** Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/legislacao/Apdfestadual/LEI9034.pdf>. Acesso em 06 de janeiro de 2014.

LIBONI, L. B.; CEZARINO, L. O. A visão sistêmica e a estratégia para a sustentabilidade: um estudo de caso no setor sucroenergético brasileiro. **Revista Gestão e conhecimento**, Poços de Caldas-MG, set. 2012. Disponível em: <https://www.pucpcaldas.br/graduacao/administracao/revista/artigos/esp1_8cbs/08.pdf>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2014.

LIMA, J. G. A. et al. PERÍODO DE RETORNO DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS PARA ALGUMAS CIDADES DO RIO GRANDE DO NORTE. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável,** Mossoró- Rn, v. 7, n. 5, p.144-149, dez. 2012. Disponível em: <http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/viewFile/1967/pdf_593>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2014.

LOPES, M. A. **A agricultura e o desafio da sustentabilidade.** Disponível em: <http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2007/artigo.2007-02-14.4893566264/>. Acesso em 07 de abril de 2013.

LOZANO, M. R. L. **Geoecologia da paisagem na avaliação do uso dos recursos hídricos da parte inicial da bacia do Ribeirão das Posses – SP.** 2013. f. 73. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Irrigação e Drenagem)- Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2013.

LPL - Engenharia e Mapeamento Digital S/s Limitada. **Suporte técnico para a implantação da cobrança pela utilização dos recursos hídricos nos domínios territoriais do Comitê da Bacia Hidrográfica do alto Paranapanema (CBH-ALPA).** 1º.Relatório de Atividades. 2011. Discussões com a Comissão Especial da Cobrança do CBH-ALPA. Disponível em: <file:///C:/Users/Alexandra/Downloads/relatorio1 (2).pdf>. Acesso em: 13 fevereiro de 2014.

MEDEIROS JÚNIOR, J. V. de et al. Simulação da dinâmica do "jogo da cerveja" através do software de modelagem e simulação empresarial SIMADM. In: SIMPEP, XII, 2006, Bauru. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/275.pdf>. Acesso em 25 de janeiro de 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE URBANO. **Enfoque Ecossistêmico Aplicado à gestão dos recursos hídricos:** Vazão Ecológica e Vazão Ambiental. 2010. Reunião da Câmara Técnica de Controle e Qualidade Ambiental/ CONAMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1306/Apresentacao_Vazao+ecologica+vazao+ambiental.pdf>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2014.

MENDONZA, C. J. C.; FRIZZONE, J. A. Economia de energia em irrigação por pivô central em função da melhoria na uniformidade da distribuição de água. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada,** Fortaleza, v. 6, n. 3, p. 184-197, out. 2012. Disponível em: <http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/121/pdf_107>. Acesso em 03 de fevereiro de 2014.

MENEZES. Direito Ambiental: Proteção Jurídica das águas doces no Brasil. **Jornal Carta Forence,** São Paulo, SP, nov. 2007. Disponível em:

<http://www.cartaforense.com.br/conteudo/colunas/protecao-juridica-das-aguas-doces-no-brasil/946>. Acesso em: 12 de maio de 2013.

OLIVEIRA, L. F. C. de et al. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambienta,** Campina Grande, v. 14, n. 11, p.186-192, nov. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010001100008>. Acesso em: 31 jan. 2014.

ONU. Disponível em: < http://www.onu.org.br/rio20/agua.pdf>. Acesso em 23 de abril de 2013.

ONU. **Un-water anual report 2012.** Disponível em: <http://www.unwater.org/fileadmin/user_upload/unwater_new/docs/UN-Water_Annual_Report_2012.pdf>. Acesso em 23 de janeiro de 2014.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Sustentabilidad de los recursos hídricos en São Miguel do Anta**, **Minas Gerais: un enfoque de dinámica de sistemas**. 2006. f.104. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas Bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. 2010. f. 174. Tese (Doutorado em Ciências/ Ecologia Aplicada) – Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz- Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

ORTEGA, A.C.; TROMBIM, M.C. **Novos mecanismos de regulação dos recursos hídricos brasileiros: um passo a frente e dois atrás na participação da sociedade**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL Anais, 38, 2000, Rio de Janeiro. Anais...Brasília, DF: SOBER, 2000.

PAZ, V. P. S. da; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. RECURSOS HÍDRICOS, AGRICULTURA IRRIGADA E MEIO AMBIENTE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambienta,** Campina Grande, v. 4, n. 3, p.465-473, 13 jan. 2000. COMUNICADO TÉCNICO. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v4n3/v4n3a25>. Acesso em: 25 de maio 2013.

PINHEIRO, S. L. G. O enfoque sistêmico e o desenvolvimento rural sustentável: Uma oportunidade de mudança da abordagem hard-systems para experiências com solft-systems. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, RS, v. 1, n. 2, 2000. Disponível em: <http://www.agriculturasamazonicas.ufpa.br/PDF'S/Sergio%20Pinheiro%20-%20Abordagem%20sist%C3%AAmica%20(HS%20e%20SS)%20OK.pdf>. Acesso em 28 de janeiro de 2014.

PINHEIRO, S. L.G.; PEARSON, C. J.; CHAMA, S. Enfoque sistêmico, participação e sustentabilidade na agricultura. I: novos paradigmas para o desenvolvimento rural?. **Revista Agropecuária Catarinense,** Santa Catarina, SC, v.10, n. 1, 1997. Disponível em: <http://www.geocities.ws/grupopeap/artigos/Pinheiro_et_al_1997_RACa.pdf>. Acesso em 01 de fevereiro de 2014.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera:** conceitos, processos e aplicações. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012. 500 p.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: Mc-Graw-hill, 1978. 119 p.

RIBEIRO, W. C. Desenvolvimento sustentável e segurança ambiental global. **Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales**, n. 312, p.5, 2001. Disponível em: < http://www.ambiente.sp.gov.br/cea/files/2011/12/WagnerRibeiro.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2013.

SALES, M. A. L. de. **Balanço hídrico na sub-bacia hidrográfica do Boi Branco – SP para gestão sustentável da agricultura irrigada.** 2014. f. 90. Dissertação (Mestrado em

Agronomia-Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2014.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M.V. **Modelo em dinâmica de sistemas para a gestão dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.** 2008. 106 f. Relatório (Pós-Doutorado em Engenharia Rural) - Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí utilizando modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 578-590, out./dez, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v29n4/v29n4a8.pdf>. Acesso em 06 de fevereiro de 2014.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Water resources assessment at Piracicaba, Capivari and Jundiaí river basins: a dynamic systems approach. **Water Resources Management**, v.4, p.761-773. 2010.

SANNINO, F. **A Dinâmica em um projeto de tecnologia de grande porte.** 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/8726/8726_3.PDF>. Acesso em 01 de abril de 2013.

SANTOS, D. B. do. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio São José, Nova Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas ciências Agrárias,** Guarapuava, PR, v. 5, n. 2, p. 7 a 18, 2012. Disponível em: <http://projetos.unioeste.br/pos/media/File/energia_agricultura/Caracterizacao_morfometrica_da_bacia_hidrografica.pdf>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2014.

SARMENTO, A. P. et al. Análise da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Forqueta. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011. Disponível em:

<https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/539cf100eaac4f0cde2d04964cd38b9b_e0a0d75d1aa55f64dcf278332e838bd3.pdf>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2014.

SETTI, A.A.; et al. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Agência Nacional da Água. Brasília, 2000.

SILVA, C.H.R.T. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável no Brasil.** Disponível em: <http://www12.senado.gov.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/outras-publicacoes/temas-e-agendas-para-o-desenvolvimento-sustentavel/recursos-hidricos-e-desenvolvimento-sustentavel-no-brasil>. Acesso em 01 de abril de 2013.

SILVA, F. M. et al. O pensamento sistêmico e o mundo do trabalho pós-Fordista. **Revista Multidisciplinar de Humanidades,** Vassouras, v.2, n.1, p. 33-42, jan./jun. 2011. Disponível em: <http://www.uss.br/pages/revistas/revistamosaico/V2N12011/pdf/003_Pensamento_Sistemico_Mundo_Trabalho_PosFordista.pdf>. Acesso em 01 de fevereiro de 2014.

SISTEMS, Isee. **Stella 9.3.** 2008. Programa de simulação. Disponível em: <http://www.iseesystems.com/softwares/Education/StellaSoftware.aspx>. Acesso em: 03 mar. 2012.

SOCCOL, O. J.; CARDOSO, C. O.; MIQUELLUTI, D. J.. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambienta,** Campina Grande, v. 14, n. 6, p.569-574, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000600001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 30 jan. 2014.

SOUCHON, Y.; KEITH, P. Freshwater fish habit: Science, management and conservation in France. **Aquatic Ecosystem Health and Management Society, Philadelphia**, v.4, n.4, p.401-412, 2001.

SOUZA, M. N et al. Dinâmica de sistemas e a modelagem com o uso do programa *stella* dos recursos hídricos da bacia do Rio Preto, afluente do Rio Paracatu. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v.1, n.1, dez. 2010.

STRAHLER, A.N. **Análise quantitativa da geomorfologia das bacias hidrográficas**. Nova Halen: Transações: American Geophysical Union, 1957 v.38. p.913-920.

TELES, G. do S. et al. Aplicação de ferramentas SIG para cálculo da precipitação média em bacias hidrográficas. IV Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. 2008. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr4/arquivos/oral/07.swf>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2014.

VASCONCELLOS, M. J. E. de. Pensamento sistêmico: o novo paradigma da ciência. Disponível em: <http://www.papirus.com.br/entrevista_detalhe.aspx?chave_entrevista=3&menu=autores>. Acesso em 01 de fevereiro de 2014.

VIEIRA, W.C. Dinâmica de sistemas aplicada à gestão de recursos hídricos em bacia hidrográfica. **Revista de Economia e Agronegócio**, v.6, n.3, 2008. Disponível em: <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/53856/2/Artigo%2006.pdf>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2014.

VILLELA, P. R. C. **Introdução a Dinâmica de Sistemas**. Universidade Federal de Juiz de Fora- Faculdade de Engenharia, Juiz de Fora, 2005. Disponível em: <http://www.ufjf.br/ciro_barbosa/files/2011/02/ds_parte1.pdf>. Acesso em 13 de abril de 2013.

VITOR, J.; AÑEZ, M.; VERAS, M. Modelagem e simulação de negócios: método scorecard dinâmico aplicado à formulação de estratégias. **Revista Sistemas & Gestão**, v. 2, n. 2, p. 232-247, set./dez. 2007.

9. APÊNDICE

Equações geradas para a análise dos cenários no software Stella (versão: 9.3.1).

AGUA_ESTOQUE(t) = AGUA_ESTOQUE(t - dt) + (OFERTA - DEMANDA - Saida) * dt
INIT AGUA_ESTOQUE = OFERTA-DEMANDA
INFLOWS:
OFERTA = AguaSubterranea+AguaSuperficial
OUTFLOWS:
DEMANDA = AGRICOLA+AMBIENTAL+POPULACIONAL
Saida = AGUA_ESTOQUE-Evapo_dos_acudes
PopRural(t) = PopRural(t - dt) + (IncPopRural) * dt
INIT PopRural = 300
INFLOWS:
IncPopRural = PopRural*TaxCrescPop
AGRICOLA = (AreaIrrigada*ConsMed_Cultivos*10)/(Ef_Sistema)
AguaSubterranea = 0.10*8071*Precipitacao
AguaSuperficial = 17376336
AMBIENTAL = 434408.4
Area_Total_Acudes = 117.11
AreaIrrigada = 2009.24
ConsMed_Cultivos = 525/Fator_de_Variabilidade_Climática
ConsRural = PopRural*(Demanda_x_hab*365)
Demanda_x_hab = 0.169
Ef_Sistema = 0.9
Evapo_dos_acudes = Area_Total_Acudes*Evapo_Potencial*10
Evapo_Potencial = 1070.4/Fator_de_Variabilidade_Climática
IS = AGUA_ESTOQUE/OFERTA
ISaguaSup = (AguaSuperficial-DEMANDA)/AguaSuperficial
POPULACIONAL = ConsRural
Precipitacao = 13299.2*Fator_de_Variabilidade_Climática
TaxCrescPop = 0.0001353
Fator_de_Variabilidade_Climática = GRAPH(TIME)
(2011, 0.87), (2017, 0.87), (2022, 0.87)