

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS PESQUEIRAS
NOS TRÓPICOS – PPG-CIPET

TESE DE DOUTORADO

MODELO DE GESTÃO PARA CRIAÇÃO DE ESPÉCIES AMAZÔNICAS EM SISTEMA SEMI-INTENSIVO: UM ESTUDO DE CASO TAMBAQUI (*Colossoma macropomum* CUVIER, 1818).

JOAQUIM MACIEL DA COSTA CRAVEIRO

Manaus – Amazonas/2016

JOAQUIM MACIEL DA COSTA CRAVEIRO

MODELO DE GESTÃO PARA CRIAÇÃO DE ESPÉCIES AMAZÔNICAS EM SISTEMA SEMI-INTENSIVO: UM ESTUDO DE CASO TAMBAQUI (*Colossoma macropomum* CUVIER, 1818).

Tese de doutorado apresentada a Coordenação de Pós-Graduação em Ciências Pesqueiras nos Trópicos - CIPET/UFAM, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em ciências Pesqueiras nos Trópicos, área de concentração Uso Sustentável de Recursos Pesqueiros Tropicais.

Orientador:

Carlos Edwar de Carvalho Freitas, Dr. / UFAM

Co-orientador:

Bruno Adan Sagratzki Cavero, Dr. / UFAM

Ficha Catalográfica
(Catalogação na fonte pelo Departamento de Biblioteconomia da UFAM)

C898m Craveiro, Joaquim Maciel da Costa
MODELO DE GESTÃO PARA CRIAÇÃO DE ESPÉCIES
AMAZÔNICAS EM SISTEMA SEMI-INTENSIVO: UM ESTUDO DE
CASO TAMBAQUI (*Colossoma macropomum* CUVIER, 1818). /
Joaquim Maciel da Costa Craveiro. 2016
90 f.: il.; 31 cm.

Orientador: Carlos Edwar de Carvalho Freitas, Dr. / UFAM
Coorientador: Bruno Adan Sagratzki Cavero, Dr. / UFAM
Tese (Doutorado em Ciências Pesqueiras nos Trópicos) –
Universidade Federal do Amazonas.

1. Otimização. 2. modelo de produção. 3. sistema semi-intensivo.
4. desempenho econômico. 5. *Colossoma macropomum*. I. UFAM,
Carlos Edwar de Carvalho Freitas, Dr. / II. Universidade Federal do
Amazonas III. Título

JOAQUIM MACIEL DA COSTA CRAVEIRO

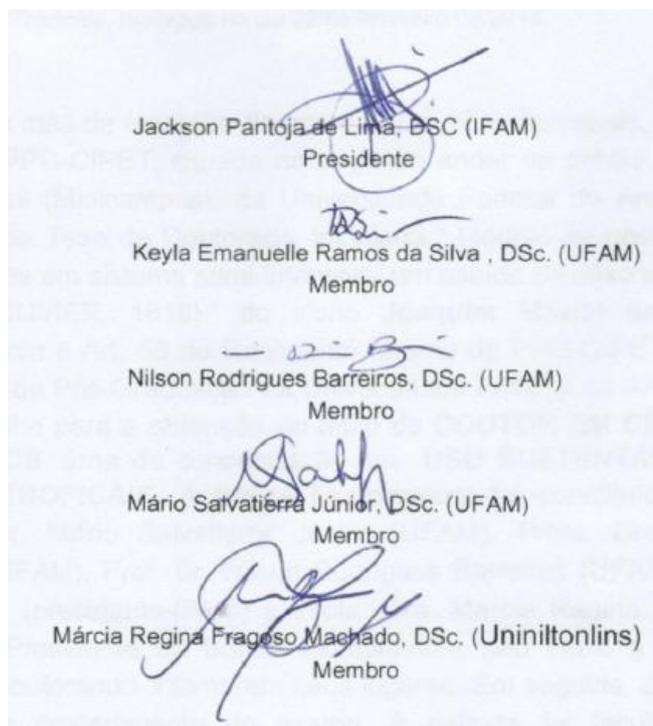
MODELO DE GESTÃO PARA CRIAÇÃO DE ESPÉCIES AMAZÔNICAS EM SISTEMA SEMI-INTENSIVO: UM ESTUDO DE CASO TAMBAQUI (*Colossoma macropomum* CUVIER, 1818).

Tese de doutorado apresentada a Coordenação de Pós-Graduação em Ciências Pesqueiras nos Trópicos - CIPET/UFAM, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em ciências Pesqueiras nos Trópicos, área de concentração Uso Sustentável de Recursos Pesqueiros Tropicais.

Manaus, 22 de fevereiro de 2016

BANCA EXAMINADORA

Aprovado em: 22/02/2016



DEDICATÓRIA

A minha mãe Yolanda Maciel, que muito se dedicou na criação e educação de seus filhos e incentivou e me estimulou para que atingisse este resultado, dedico-lhe esta conquista como gratidão.

AGRADECIMENTOS

Conseguir chegar ao final de uma tese exige muita persistência. Porém, isso somente foi possível graças a todos que cito, e até mesmo àqueles que não foram lembrados, que me ajudaram na realização desta conquista.

Primeiramente, a Deus, por me inspirar e me capacitar com sua infinita sabedoria para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a minha família, pelo apoio para a realização deste projeto, compreendendo-me. A minha filha Jhenifer e meu filho Gabriel, com sua compreensão e abdicção da minha presença para que pudesse me dedicar ao trabalho.

A minha mãe, Yolanda Maciel, pelo seu esforço em ensinar-me a sempre buscar a virtude da ética, do trabalho, e do conhecimento, e jamais me contentar com o presente. Ao meu pai (*in memoriam*) e aos meus irmãos que me ensinam o valor da humildade, pela compreensão e apoio que a mim dispensaram para que pudesse empenhar-me neste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Carlos Edwar de Carvalho Freitas, pela paciência, dedicação e aprimoramento no qual teve com este trabalho, principalmente pela sua colaboração e orientação. Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Bruno Adan Sagratzki Caveró, pela dedicação em compartilhar sua experiência e capacidade intelectual para conquista deste resultado. A prof^a. Kedma Cristine Yamamoto coordenadora PPG-CIPET/UFAM pela credibilidade que a mim confiaram. Muito obrigado!

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pela bolsa de doutorado: Decisão N. 188/2013 referente ao Edital N. 005/2013 - RH-Interiorização - Fluxo Contínuo.

Aos amigos acadêmicos pela assistência e constante apoio especialmente a Karla Tribuzy, apoiando-me em tudo que precisei para tornar este trabalho numa realidade.

A todos que, mesmo não sendo citado, mais que colaboraram diretamente ou indiretamente para que esse projeto se tornasse real, o meu muito obrigado.

*"Nunca se afaste de seus sonhos, pois se eles se forem,
você continuara vivendo, mas terá deixado de existir"*

Charles Chaplin

RESUMO

Esta tese teve como proposta, levantar a questão sobre qual mix de peso para o mercado, representa a maximização da produção para o cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanque semiescavado. Sendo um dos sistemas produtivos da aquicultura amplamente utilizada na piscicultura semi-intensiva na Região Norte do Amazonas. E estratégias de gestão podem ser estabelecidas com uso da teoria das filas e pesquisa operacional, para manipular e controlar seu processo de produção, aferindo melhor resultado. Em nosso caso, duas hipóteses foram feitas, a primeira Ho^1 : que considerando a densidade e parâmetros físicos-químicos controlados, o mix de produto não influencia no lucro obtido com a despesa de peixe. No qual foi avaliado um cenário real de layout de tanques semiescavados para o cultivo de tambaqui, visando obter um algoritmo matemático para simular as combinações de mix de peso e demanda de mercado que maximizem a produção de biomassa por tanque. A segunda Ho^2 : sob mesma condição, o tempo de saída na fase de alevinagem não influencia no lucro obtido com a despesa de peixe. Em que foram avaliados cenários com tempos discretos prefixados na alevinagem, que resultasse uma maior lucratividade na despesa com mix de peso. Na fazenda, o volume de negócio atual visava atender a demanda para frigoríficos, que preferem peixes despescados com peso de 0,5 kg. Com base na situação real, em resposta a primeira hipótese, o algoritmo matemático gerados, foram simulados com cenários layouts para 5 e 10 tanques (representando pequeno e grande piscicultor). E obteve para o planejamento de despesa, a maior rentabilidade de R\$ 32.379,10 e R\$ 51.846,90 para mix de pesos 0,5 kg; 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg respectivamente, para layout com 10 tanques. Em resposta à segunda, seguindo a mesma premissa e condições da primeira, mas com tempo na alevinagem préfixados em “30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 dias” na fase – I. Obteve para o planejamento de despesa, valores variando entre R\$ 46.930,20 a R\$ 92.165,40 para o referido mix de peso, com o tempo discreto para alevinagem de 80 e 90 dias. A capacidade de biomassa em ambos foi definida pelo oxigênio dissolvido (OD) para o peixe no tanque, com taxa de mortalidade 1% em cada fase. Os dados: preço de venda R\$ 4,00/kg, R\$ 5,00/kg, e R\$ 6,50/kg para peixes com 0,5 kg; 1 kg e 2 kg; e conversão alimentar de 1:1, 1,2:1, 1,6:1 respectivamente. O preço da ração no período foi R\$ 1,44/kg. Algumas limitações devem ser observadas, uma vez que estes resultados não foram considerando o horizonte de tempo contínuo na fase – I alevinagem, e *gaps* (lacunas de tempo) foram identificados entre as sucessivas fases, e podem ser alvo de novos estudos que melhorem ainda mais a rentabilidade na piscicultura.

Palavras chaves: Otimização, modelo de produção, sistema semi-intensivo, desempenho econômico, *Colossoma macropomum*

ABSTRACT

This study aimed, raising the question of what weight mix for the market, is the maximization of production for the cultivation of tambaqui (*Colossoma macropomum*) in semiescavad tank. It is a productive aquaculture systems widely used in semi-intensive fish farming in the north of the Amazon. Management strategies can be established to manipulate and control your production process as other cultivated species, assessing best result. In our case, two assumptions were made, HO1: Considering the density and physical-chemical parameters controlled, the product mix has no effect on the profit achieved in the final fish removal in fish production. The second, Ho2: The exit time in nursery phase does not influence the profit. On the farm, the current business volume was intended to meet the demand for refrigerators, preferring despescados fish weighing 0.5 kg. Based on the actual situation, in response to the first hypothesis, mathematical algorithm generated, were simulated with scenarios layouts to 5:10 tanks (representing small and large fish farmer), and the ability of biomass to both equal to 2400 kg, set by dissolved oxygen (OD) to the fish in the tank, the mortality rate was 1% in each stage. With premise fish removal mix weight 0.5 kg, 1 kg and 0.5 kg, 1 kg, 2 kg. And with prices for sale as follows: R \$ 4.00 / kg; R \$ 5.00 / kg; R \$ 6.50 / kg for fish with 0.5 kg; 1 kg and 2 kg, respectively, and feed conversion ratio of 1:1, 1.2:1, 1.6:1 and the ration price R \$ 1.44 / kg. Obtained for planning fish removal, the higher profitability of R \$ 32,379.10 and R \$ 51,846.90 respectively to the mix, to layout 10 tanks. In response to the second and following the same premise conditions for the first, but over time the pre-set nursery on "30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 days" in phase I- obtained for fish removal planning in order to maximize net income values ranging from R \$ 46,930.20 to R \$ 92,165.40 was for that weight mix with the nursery time of 80 and 90 days. Some limitations must be observed, since these results were not considering the continuous time horizon in phase - I nurseries, as well as gaps (time gap) between the identified successive stages being feasible for further studies.

Key words: Optimization, production model, semi-intensive system, economic performance,

Colossoma macropomum

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

FIGURA 1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO. (LATITUDE SUL: -02 46' 41,93 LONGITUDE WG' -59 21' 53,71)	28
FIGURA 2. CENÁRIO 1A: CORRESPONDE À SITUAÇÃO REAL EM UM DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO '2, 8 LAYOUT' EM TANQUE SEMIESCAVADO DE ESCALA COMERCIAL NO INTERIOR DO AMAZONAS. ONDE REPRESENTA A CHEGADA DO LOTE DE PEIXE PASSANDO PELO CRESCIMENTO INICIAL NA FASE I – ALEVINAGEM E A TAXA DE PARTIDA PARA FASE II - ENGORDA. SI É A QUANTIDADE DE TEMPO GASTO ESPERADO POR UM PEIXE EM FASE DE CRESCIMENTO I.	37
FIGURA 3. REPRESENTA CENÁRIO 1B, UM DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO '1, 4, 2, 2 LAYOUT' EM TANQUE SEMIESCAVADO. ONDE REPRESENTA A ENTRADA LOTE DE ALEVINOS NO SISTEMA, PASSANDO PELA FASE I, E AS TAXAS DE PARTIDAS PARA FASES DE ENGORDA II, III E IV. SI É A QUANTIDADE DE TEMPO GASTO ESPERADO POR UM PEIXE EM FASE DE CRESCIMENTO I.	39
FIGURA 4. PESO FINAL DO TAMBAQUI EM FUNÇÃO DO TEMPO QUE CORRESPONDE ÀS SUCESSIVAS FASES, ONDE AS VARIÁVEIS (T1, T2, T3) FORAM UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO PARA DEFINIR OS CUSTOS DE PRODUÇÃO.	41
FIGURA 5. INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE PEIXES/HA SOBRE OD DISPONÍVEL MG/L DADO PELA EQUAÇÃO $Y = -0,00008x + 3,5$ RESULTADO DA PESQUISA COM TAMBAQUI ONDE, Y= OXIGÊNIO DISSOLVIDO, X= QUANTIDADE DE PEIXE.....	44
FIGURA 6. CURVA DE CRESCIMENTO EM PESO TAMBAQUI (COLOSSOMA MACROPOMUM), EM PISCICULTURA SEMI-INTENSIVA, ESCALA COMERCIAL, NO PERÍODO ABRIL/2012 A NOVEMBRO/2013. DADOS DA PESQUISA REGISTRADOS DE TRÊS CICLOS E 100 AMOSTRAS POR UNIDADE EXPERIMENTAL TOTAL 6 TANQUES, NO INTERIOR DO AMAZONAS.	46

Capítulo 2

FIGURA 7. CENÁRIO 1A: CORRESPONDENTE SITUAÇÃO REAL EM UM DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO '2, 8 LAYOUT' EM TANQUE SEMIESCAVADO DE ESCALA COMERCIAL NO INTERIOR DO AMAZONAS. ONDE REPRESENTA A CHEGADA DO LOTE DE PEIXE PASSANDO PELO CRESCIMENTO INICIAL NA FASE I – ALEVINAGEM E A TAXA DE PARTIDA PARA FASE II - ENGORDA. SI É A QUANTIDADE DE TEMPO GASTO ESPERADO POR UM PEIXE EM FASE DE CRESCIMENTO I.	63
FIGURA 8. REPRESENTA CENÁRIO 1B, UM DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO '1, 4, 2, 2 LAYOUT' EM TANQUE SEMIESCAVADO. ONDE REPRESENTA A ENTRADA LOTE DE ALEVINOS NO SISTEMA, PASSANDO PELA FASE I, E AS TAXAS DE PARTIDAS PARA FASES DE ENGORDA II, III E IV. SI É A QUANTIDADE DE TEMPO GASTO ESPERADO POR UM PEIXE NA FASE DE CRESCIMENTO I.	65
FIGURA 9. REPRESENTA CENÁRIOS LAYOUT 5 TANQUES COM MIX PESO ALVO PARA MERCADO PARA O TAMBAQUI EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES TEMPOS ALEVINAGEM PREFIXADOS (30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 e 100 DIAS) NA FASE I PARA ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO NO SISTEMA. NOTE QUE O SISTEMA SE ESTABILIZA A PARTIR DA FASE III E IV E SERVIRÁ PARA PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO DO SISTEMA DE PISCICULTURA COM POSSIBILIDADE DE DIVERSOS CENÁRIOS DE DESPESCA.	69
FIGURA 10. REPRESENTA OTIMIZAÇÃO DO LUCRO OBTIDO EM RELAÇÃO A DIFERENTES TEMPOS DE ALEVINAGEM, E COMPARA DUAS ESTRATÉGIAS DE DESPESCA DE PRODUÇÃO DO TAMBAQUI COM PESO ALVO PARA O MERCADO: 0,5 KG, E 0,5 KG, 1 KG.	73
FIGURA 11. REPRESENTA OTIMIZAÇÃO DO LUCRO OBTIDO EM RELAÇÃO A DIFERENTES TEMPOS DE ALEVINAGEM, E COMPARA DUAS ESTRATÉGIAS DE DESPESCA DE PRODUÇÃO DO TAMBAQUI COM PESO ALVO PARA O MERCADO: 0,5 KG, 1 KG E 0,5 KG, 1 KG, 2 KG.....	74
FIGURA 12. NOTE A INFLUÊNCIA NA QUANTIDADE DE PEIXES/HA SOBRE OD DISPONÍVEL MG/L DADO PELA EQUAÇÃO $Y = -0,00008x + 3,5$ RESULTADO DA PESQUISA COM TAMBAQUI ONDE, Y= OXIGÊNIO DISSOLVIDO, X= QUANTIDADE DE PEIXE.....	75
FIGURA 13. CURVA DE CRESCIMENTO EM PESO TAMBAQUI (COLOSSOMA MACROPOMUM), EM PISCICULTURA SEMIINTENSIVA, ESCALA COMERCIAL, NO PERÍODO ABRIL/2012 A NOVEMBRO/2013. DADOS DA PESQUISA REGISTRADOS DE TRÊS CICLOS E 100 AMOSTRAS POR UNIDADE EXPERIMENTAL TOTAL 6 TANQUES, NO INTERIOR DO AMAZONAS.	77
FIGURA 14. EFICIÊNCIA DE LUCRATIVIDADE NA PRODUÇÃO DO TAMBAQUI EM TANQUE SEMIESCAVADO COMPARANDO O TEMPO DE ALEVINAGEM EM RELAÇÃO AO MIX DE PESO PARA O MERCADO.....	79

LISTA DE TABELAS

Revisão da Literatura

TABELA 1. MANEJO ALIMENTAR TRADICIONAL DO TAMBAQUI (C. MACROPOMUM) UTILIZADO NAS PISCICULTURAS REGIONAIS DO ESTADO DO AMAZONAS.....	19
---	----

CAPÍTULO 1

TABELA 2. REDUÇÃO DA PRODUÇÃO EM '1, 4, 2, 2 LAYOUT' PELA AÇÃO PERÍODO DE CRESCIMENTO DO TAMBAQUI EM DIAS.	43
TABELA 3. BIOMASSA MÁXIMA DE TAMBAQUI PELA DISPONIBILIDADE DE OD PARA O PEIXE NO TANQUE	45
TABELA 4. OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO TAMBAQUI EM TANQUE SEMIESCAVADO.....	47
TABELA 5. CUSTO OPERACIONAL PARCIAL (COP) DA PRODUÇÃO BIOMASSA TAMBAQUI EM TANQUE SEMIESCAVADO	48

Capítulo 2

TABELA 6. VALORES DE TEMPO PREFIXADO PARA ALEVINAGEM.....	64
TABELA 7. LUCRO LÍQUIDO EM RELAÇÃO AOS DIFERENTES TEMPOS DE ALEVINAGEM DO TAMBAQUI	72
TABELA 8. CUSTO OPERACIONAL PARCIAL (COP) DA PRODUÇÃO BIOMASSA TAMBAQUI EM TANQUE SEMIESCAVADO	72
TABELA 9. BIOMASSA MÁXIMA DE TAMBAQUI PELA DISPONIBILIDADE DE OD PARA O PEIXE NO TANQUE	75

Sumário

1. INTRODUÇÃO GERAL	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 GERAL	17
2.2 ESPECÍFICOS.....	17
3. REVISÃO DA LITERATURA	18
3.1 O CULTIVO DE TAMBAQUI.....	18
4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL	28
4.1 ÁREA DE ESTUDO E OBTENÇÃO DOS DADOS	28
4.2 SOBRE A ESPÉCIE	29
4.3 <i>Os parâmetros de desempenho zootécnicos foram estimados conforme a metodologia a seguir:</i>	29
4.4 <i>Análises estatísticas</i>	30
4.5 <i>Parâmetros técnico/econômicos do cultivo</i>	30
4.6 <i>Curva de crescimento estimada em peso para o tambaqui</i>	31
5. CAPÍTULO 1 - OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA TAMBAQUI EM PISCICULTURA SEMI-INTENSIVA NA REGIÃO NORTE DO AMAZONAS*	32
5.1 INTRODUÇÃO	35
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	36
5.2.1 SOBRE O PEIXE E OBTENÇÃO DOS DADOS	36
5.2.3 CONCEITUANDO SISTEMA DE FILA LOTES DE PEIXES PARA SIMULAÇÃO	37
5.2.2 FORMULAÇÃO DO SISTEMA DE FILA LOTES DE PEIXES E APLICAÇÃO EM TANQUE SEMIESCAVADO	38
5.2.1 O MODELO DE OTIMIZAÇÃO	41
5.3.1 A ESTABILIDADE DO SISTEMA DE FILA LOTE DE PEIXES	42
5.3.2 CÁLCULO DO NÚMERO SUGERIDO EM DIAS PARA CADA FASE DE CRESCIMENTO NO TANQUE	42
5.3.3 CRITÉRIO DO NÚMERO DE PEIXE EM CADA LOTE	44
5.3.4 SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO TAMBAQUI COM MIX DE PESO ALVO PARA MERCADO	45
5.3.5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA	47
5.4 DISCUSSÃO	48
5.5 CONCLUSÕES	50
AGRADECIMENTOS	50
DIVULGAÇÃO	51
REFERÊNCIAS	51
6. CAPÍTULO 2 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ALEVINAGEM NA OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO TAMBAQUI EM PISCICULTURA SEMI-INTENSIVA NA REGIÃO NORTE DO AMAZONAS*	58
6.1 INTRODUÇÃO	61
6.2 MATERIAL E MÉTODO	62
6.2.1 SOBRE O PEIXE E OBTENÇÃO DOS DADOS	62
6.2.2 CONCEITUANDO SISTEMA DE FILA LOTES DE PEIXES COM TEMPO DE ALEVINAGEM PREFIXADOS	63
6.2.3 FORMULAÇÃO DO CÁLCULO DO NÚMERO EM DIAS EM CADA FASE NO SISTEMA	66
6.2.4 O MODELO DE OTIMIZAÇÃO	67
6.3 RESULTADOS	70
6.3.2 CÁLCULO DO NÚMERO SUGERIDO EM DIAS PARA CADA FASE DE CRESCIMENTO NO TANQUE	70
6.3.1 O SISTEMA DE FILA LOTE DE PEIXES EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES TEMPOS ALEVINAGEM NA FASE I	71
6.3.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA	72

6.3.4	CRITÉRIO DO NÚMERO DE PEIXE NAS SUCESSIVAS FASES DE CRESCIMENTO	74
6.3.5	ESTIMAÇÃO DA CURVA DE CRESCIMENTO EM PESO DO TAMBAQUI EM PISCICULTURA SEMI-INTENSIVA	76
6.4	DISCUSSÃO	77
6.5	CONCLUSÕES	80
	AGRADECIMENTOS	80
	DIVULGAÇÃO	80
	REFERÊNCIAS.....	81

Apresentação

A tese está dividida em dois capítulos, o Capítulo 1 - Otimização da produção de biomassa tambaqui em piscicultura semi-intensiva na Região Norte do Amazonas, buscou levantar a questão sobre qual mix de peso para o mercado, representa a maximização da produção para o cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanque semiescavado. E apresenta como resultado o algoritmo gerado com melhor mix de produção, em resposta a H0¹. O Capítulo 2 - Influência do tempo de alevinagem na otimização da produção de biomassa tambaqui em piscicultura semi-intensiva na Região Norte do Amazonas, teve como premissa avaliar o mix de peso para o mercado obtido com a variação do tempo pré-fixados na alevinagem, que represente a maximização da produção para o cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanque semiescavado, em resposta a H0². Na seção de Considerações Finais são propostos aplicação do modelo de gestão para criação de espécies amazônicas em viveiros semiescavados em escala comercial, em cenários para produção de tambaqui em diferentes tempos de alevinagem e engorda com mix peso alvo para o mercado.

Conforme recomendação deste Programa de Pós Graduação da UFAM, do curso de Ciências Pesqueiras nos Trópicos os capítulos desta tese encontram-se em formato de manuscritos adaptados com as normas das revistas onde serão submetidas. Entretanto, para facilitar à leitura e análise dos capítulos, as figuras e tabelas foram organizadas no corpo do texto.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A aquicultura apresenta recorde de crescimento na indústria de produção de alimentos, com crescimento mais acentuado na Ásia (WURMANN, 2010). No entanto, países da América do Sul, como o Brasil, com potencial para gerar excedentes na aquicultura marinha e de água doce (FAO, 2012,2014). Têm apresentado um crescimento nas importações de pescado no valor de US\$ 1,252 bilhões para US\$ 1,452 bilhões no período de 2012 a 2014 dentre os principais países de origem são Chile, China e Vietnã, representados pelas principais espécies: salmão; merluza; e pangasius respectivamente (MPA, 2015). Supridos pela produção aquícola continental nacional, destacando-se a criação de tilápia (198.664 toneladas), tambaqui (139.209 toneladas), tambacu e tambatinga (40.266 toneladas) (IBGE, 2014).

No Amazonas, o sistema de criação semi-intensivo em tanque semiescavado é a modalidade mais empregada pela piscicultura comercial (GOMES & SILVA, 2009; CAVERO et al., 2009; IZEL & MELO, 2004). Sendo o tambaqui (*Colossoma macropomum*), a principal espécie nativa cultivada (CAMPOS et al., 2015; SOUSA; FREITAS, 2010), em face do alto valor comercial e características zootécnicas como rusticidade e crescimento rápido (TEICHERT-CODDINGTON, 1996; ARAUJO-LIMA & GOULDING, 1997; SEVILLA & GUNTHER 2000; SILVA et al., 2007). Porém, sua produção é muito baixa, representando 9,9% em relação à produção aquícola nacional (IBGE, 2014).

Em geral estratégias de gestão tem se desenvolvido para controlar a densidade de cada ciclo (SEGINER, 2009), como a qualidade da água (SURESH & LIN, 1992), o bem estar do peixe, seu estado condição e parâmetros fisiológicos (ARANEDA et al., 2008; TOLUSSI et al., 2010), o crescimento e as taxas de sobrevivência em cada fase (HITZFELDER et al., 2006; HONKOOOP & BAYNE, 2002; MOYLE et al., 2009; GOMES & SILVA, 2009) bem como técnica de avaliação dos parâmetros de rendimento e produtividade (HENGSAWAT et al., 1997; TRINO et al., 1999; ROWLAND et al., 2006; HALACHMI, 2012) podem ser estabelecidas para manipular e controlar o processo de produção para a espécie cultivada, visando aferir melhor resultado (HILLIER & LIEBERMAN, 2010; LORENTZEN, 2008). Sendo importante demonstrar no desempenho econômico os custos de produção e receita, considerados estratégicos para avaliar a lucratividade aquícola.

Em geral métodos utilizados na gestão dos processos industriais, vem sendo aplicado no processo de planejamento da aquicultura adequando a teoria das filas (TF) e pesquisa operacional (PO), promovendo soluções para aumentar sua eficiência e a rentabilidade (BJORNDAL, 2004; HERNANDEZ et al., 2007; LAW & KELTON, 2000; BANKS, 1998; GROSS, 2008). Neste caso, o tanque escavado pode ser visto como uma sequencia em fila, sendo o tempo de crescimento do

peixe considerado como um processo estocástico, que trata as transições entre os estados como um processo de Markov variável no tempo, isto é, um processo no qual a probabilidade de passar de um estado para outro depende apenas do estado atual (FORSBERG, 1996; WINSTON, 2004; SUMMERFELT et al., 2009; HALACHMI, 2012; STEHFEST et al., 2015). E cada fase de crescimento, com a probabilidade do peso de um indivíduo em uma série de transições entre a fase de alevinagem t_0 e fase de engorda t_1 para um determinado momento futuro pode ser estimada (SPARRE, 1976; SUMMERFELT et al., 1993; HALACHMI, 2007, 2012). Entretanto, as técnicas de apoio à decisão para o planejamento de estratégia de despesca com peso alvo para o mercado que resulte maior lucratividade ainda estão aberta a investigação.

Portanto, a presente tese buscou testar duas hipóteses a primeira H_0^1 : que considerando a densidade e parâmetros físicos-químicos controlados, o mix de produto não influencia no lucro obtido com a despesca de peixe. No qual foi avaliado um cenário real de layout de tanques semiescavados para o cultivo de tambaqui, visando obter um algoritmo matemático para simular as combinações de mix de peso e demanda de mercado que maximizem a produção de biomassa por tanque. A segunda H_0^2 : que considerando a densidade e parâmetros físicos-químicos controlados, o tempo de saída na fase de alevinagem não influencia no lucro obtido com a despesca de peixe. Em que foram avaliados cenários com tempos discretos prefixados na alevinagem, que resultasse uma maior lucratividade na despesca com mix de peso. Ainda que a solução ótima encontrada neste estudo represente o cultivo de uma espécie e sob condições locais, o procedimento pode ser ajustável ao cultivo de outras espécies e a outros sistemas aquícolas.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Propor um modelo de gestão para criação de espécies amazônicas em viveiros semiescavados em escala comercial, com cenários para produção de tambaqui com diferentes combinações de tempos de alevinagem e engorda.

2.2 Específicos

Conceber um sistema de gestão eficaz para piscicultura do tambaqui, através do estudo da teoria das filas considerando restrições da produção.

Avaliar o cenário 1A (real): layout (tamanho e quantidade de tanques); calcular a frequência ótima de chegada (entrada de alevinos) e saída (com a despesca); avaliar tamanho lote de peixes; avaliar volume de negócios (tonelada/ano); e avaliar equilíbrio de produção com mix de peso (cenário 1B simulado).

Avaliar as características de desempenho do tambaqui, mantidos em viveiros com mesma densidade de estocagem, mesmo manejo em diferentes tempos de cultivos, visando:

- Desempenho produtivo: taxa de sobrevivência; biomassa final e produtividade; peso médio; consumo de ração; e conversão alimentar aparente.
- Avaliação econômica: incidência de custos; e receita líquida parcial.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O cultivo de Tabaqui

O tabaqui (*Colossoma macropomum*) é a espécie nativa mais cultivada no Brasil com uma produção de 139.209 toneladas em 2013 na qual o Amazonas contribuiu com uma pequena parcela de 13.805 toneladas representando 9,9% (IBGE, 2014). Esta espécie é nativa da bacia Amazônica e Orinoco, apresenta um hábito alimentar onívoro (HONDA, 1974; GOULDING e CARVALHO, 1982), alimentando-se de zooplâncton, sementes e frutos (CARVALHO, 1981; SILVA et al., 2003; CLARO-Jr et al., 2004), adaptações fisiológicas e anatômicas aos ambientes com baixa concentração de oxigênio e pode ser cultivado em altas densidades (SILVA et al., 1975; SAINT-PAUL, 1986; WOYNAROVICH & HORVATH, 1983; CASTAGNOLI & CYRINO, 1986; PINHEIRO & SILVA, 1988; GRAEF, in: VAL & HONCZARYK, 1995), MELO et al., 2001; LOPERA-BARRERO et al., 2011). Sua criação tem sido impulsionada principalmente pelo fato desta espécie apresentar alto valor comercial, excelente aceitação pelo consumidor (GARCEZ, 2009), crescimento rápido principalmente durante a fase jovem (VILLACORTA-CORREA, 1997; LOPERA-BARRERO et al., 2011).

A criação do tabaqui é realizada principalmente em viveiros semiescavados fertilizados, devido suas características de aproveitamento do alimento natural disponível no viveiro (PAULA, 2009; CAVERO et al., 2009), mas também tem ocorrido em tanques-rede (BRANDÃO et al., 2004), barragens (PEREIRA et al., 2009) e em canais de igarapé (ARBELAEZ-ROJAS et al., 2002). Dentre esses sistemas, os melhores resultados têm sido obtidos em viveiros semiescavados (PEREIRA, 2009; PAULA, 2009; CAVERO et al., 2009; BARROS & MARTINS, 2012). Por meio dos agentes que compõem sua cadeia produtiva tem-se buscado aperfeiçoar o desempenho produtivo e econômico da criação, de modo que esta espécie tem sido alvo de estudos voltados a melhorar as condições de cultivo e manejo e aumentar o desempenho zootécnico e econômico (SILVA et al., 2007; ISIMÑO-ORBE et al., 2003; NUNES et al., 2006; CHAGAS et al., 2007; GOMES & SILVA, 2009; ARAÚJO-LIMA & GOMES 2010).

Crepaldi et al., (2007), ressaltam que os sistemas de produção de peixes devem estar diretamente relacionados aos objetivos do empreendimento, isto é, o mercado a ser atingido, a espécie a ser cultivada, a disponibilidade de água, energia elétrica e os aspectos legais e socioculturais. E a produção é beneficiada de acordo com as condições requeridas pelo mercado consumidor, e posteriormente distribuída entre atacado e varejo, chegando aos consumidores através das feiras, mercados, supermercados, frigoríficos, etc. (MARTINS et al., 2000). Na Região Metropolitana de Manaus, o tabaqui produzido pela piscicultura é comercializado na forma de três produtos caracterizados pela classe de peso: entre 0,350 e 0,450kg, denominado tabaqui curumim,

cujo mercado principal são frigoríficos, restaurantes e cozinhas industriais; e entre 0,800 e 1,5kg denominado tambaqui roelo, comercializado in natura a supermercados, frigoríficos e feiras; e o tambaqui acima de 2,0 kg, comercializado em mercados e feiras (GANDRA, 2010).

No Estado do Amazonas, o principal sistema de produção empregado na produção comercial do tambaqui é a modalidade semi-intensiva sem fluxo contínuo de água em estruturas compostas por viveiros de argila escavados e semiescavados. Este sistema de produção tem como principal característica o baixo fluxo de renovação de água, em função da importância em se manter os nutrientes no viveiro para garantir a produtividade primária, havendo, no entanto, reposição das perdas por infiltração e evaporação (GOMES & SILVA, 2009; CAVERO et al., 2009; IZEL & MELO, 2004). O viveiro semiescavado tem estrutura construída a partir da remoção de uma parte do solo e alocada para a composição dos taludes, e são desprovidos de revestimento e recebem compactação mecânica no fundo e nos taludes para aumentar a capacidade de retenção da água. As dimensões (comprimento e largura) e o layout variam de acordo com as condições topográficas do terreno ou do nível de investimento em terraplenagem para sua construção. A altura média da coluna d'água armazenada nestas estruturas é de aproximadamente 1,5 m.

Neste sistema, a nutrição dos peixes é altamente dependente do fornecimento de rações balanceadas e de um correto manejo alimentar. A tabela 1 apresenta a forma tradicionalmente utilizada para a alimentação do tambaqui na região (IZEL & MELO, 2004; GOMES & SILVA, 2009).

Tabela 1. Manejo alimentar tradicional do tambaqui (*C. macropomum*) utilizado nas pisciculturas regionais do Estado do Amazonas.

Peso	% de Proteína	Taxa de Alimentação	Tempo
Médio (g)	Bruta na ração	(% Biomassa/dia)	(Dias)
10 – 200	36 - 32	5,0	60
200 – 2000	28	3,0	210
> 2000	24	1,0 - 2,0	>210

Fonte: autoria própria

A produtividade de tambaqui cultivado em viveiros semiescavados na modalidade semi-intensiva sem fluxo contínuo de água alcança em média de 6.000 a 8.000kg/ha/ciclo. A densidade de estocagem é em torno de 3.000 a 5.000 peixes/ha. Outras modalidades de produção são utilizadas em menor escala, tais como: semi-intensivo em barragens; e Intensiva em tanques-rede e em canais

de igarapé (GOMES & SILVA, 2009; CAVERO et al., 2009; IZEL & MELO, 2004). Na criação intensiva de peixes de água doce, um dos principais fatores que afetam o custo da alimentação se relaciona à farinha de peixe, a principal fonte de proteína utilizada na dieta destes peixes (SANTOS et al., 2009). A farinha de peixe é um recurso com disponibilidade limitada, sendo que produção mundial não atende a quantidade necessária para confecção das rações para os organismos aquáticos. O preço desta farinha tem aumentado como resultado da aceleração da demanda mundial (PEZZATO et al., 2009).

O oxigênio dissolvido é essencial à vida dos organismos aquáticos, em a demanda de oxigênio pelos organismos cultivados varia entre as espécies, ao longo das fases de desenvolvimento, com o estado nutricional, com a intensidade das atividades e com as condições do ambiente (ARANA, 2006). A dinâmica do oxigênio dissolvido em viveiros de piscicultura depende do equilíbrio entre a produção e a respiração total do sistema. A principal fonte de produção de oxigênio no ambiente aquático é proveniente da atividade fotossintética dos organismos fitoplancônicos e por difusão atmosférica. Por outro lado, o consumo total do sistema ocorre pelos processos de decomposição da matéria orgânica, oxi-redução da matéria inorgânica, trocas gasosas atmosféricas, respiração dos organismos cultivados e das comunidades planctônicas (GINOT e HERVÉ, 1993). Períodos prolongados e condições extremas de desequilíbrio no balanço de oxigênio dissolvido no ambiente de cultivo pode ocasionar ineficiência na conversão alimentar dos organismos cultivados, gerando atraso no crescimento, susceptibilidade a doenças e mortalidade, conseqüentemente prejuízos econômicos (TUCKER, 2005; ENGLE, 1989). A taxa de respiração de algumas espécies de organismos cultivados, bem como o consumo total do sistema e já é conhecida e amplamente aplicada no planejamento da produção, tais como: *Colossoma macropomum*, 250 mgO₂/kg/h (CAVERO, 2009); Bagre-do-canal 480 mgO₂/kg/h (BOYD e AHMAD, 1987); Tilápia-do-Nilo 108 mgO₂/kg/h; *Macrobrachium amazonicum* 1.304,06 mgO₂/kg/h (CASTRO, 2010), *Litopnaeus vannamei* 750 mgO₂/kg/h (AMARAL, 2003). Desta forma, o conhecimento da demanda total de oxigênio do sistema de cultivo é fundamental para estabelecer a biomassa a ser estocada e o período de duração em cada fase de crescimento (alevinagem, recria e engorda).

3.2 Métodos de otimização dos sistemas produtivos

Os processos produtivos industriais competem de forma globalizada. Por conta disso, muitas empresas têm optado pela utilização de métodos para a otimização dos sistemas produtivos, como a programação linear e a teoria das restrições. Que irão auxiliar na estratégia de decisão no planejamento do mix de produto, de forma a atender à demanda nos prazos estabelecidos, e da maneira mais economicamente rentável (MARTINS; LAUGENI, 2005). Para as empresas que

atuam com vasto mix de produto, o método de otimização tem se voltado para escolha do produto de maior demanda, tendo em vista a satisfação dos clientes e aumento do faturamento. Nesse contexto é de suma importância para o planejamento que os dados de previsão de demanda, capacidade produtiva das máquinas, restrições de tempo e contribuição financeira dos produtos sejam apurados e confiáveis. (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002).

Diversos métodos estão disponíveis para realizar um bom planejamento da produção, dentre os quais vale destacar os métodos da teoria das filas e pesquisa operacional consideradas ferramentas da Teoria das Restrições (TOC), que preveem em seus métodos de cálculo, a análise sobre os fatores restritivos visando à maximização da receita empresarial para o auxílio na tomada de decisões. Contudo ambos devem levar em consideração as restrições de seus processos produtivos. A não consideração das restrições na realização do planejamento do mix de produção pode acarretar vários problemas a um horizonte de tempo, o que se constituiria em uma desvantagem competitiva para o negócio e principalmente perda no potencial de ganho financeiro (SOBREIRO; NAGANO, 2012).

A pesquisa operacional busca encontrar a solução melhor ou ótima para o problema proposto, identificando a melhor tomada de ação possível. Diz respeito à tomada de decisão ótima em sistemas determinísticos e probabilísticos que se originam na vida real e provém da necessidade de alocar recursos limitados. No qual muitos desses problemas práticos podem ser expressos como problemas de programação linear (PL). De acordo com Hillier & Lieberman (2006), a PL consiste em se planejar atividades de forma a se obter o melhor resultado entre as várias opções viáveis de utilização dos recursos produtivos. Em geral a PL se constitui em uma função objetivo, que pode ser maximizada ou minimizada e possui um conjunto de restrições que se constituem em equações ou inequações (SILVEIRA et al., 2013).

A teoria das filas estuda o comportamento das filas, na prática, em uma população surgem clientes que formam fila aguardando por um serviço. Quando a população é muito grande, as chegadas podem ser consideradas independentes. Nesses casos, o ritmo de chegada é uma importante variável aleatória, representada pela letra grega λ (lambda). O processo de atendimento é descrito pela taxa de atendimento μ (mi). A capacidade de atendimento é representada pela letra M, que quantifica o número de atendentes do sistema. Quando $M * \mu > \lambda$, o sistema apresenta um grau de ociosidade. Quando $\lambda > \mu$, o sistema gera fila. Em casos onde isso ocorre, devem ser utilizados alguns artifícios matemáticos com simulação e otimização para melhoria do nível de serviço (KRAJEWSKY et al., 2009; CORRÊA, 2012; HAJI & ROSS, 2015).

A grande maioria dos modelos de fila assumir um processo estático, a fim de derivar as medidas de desempenho. Na realidade, os modelos estocásticos cujos parâmetros variam

aleatoriamente ao longo do tempo, dependem do estado do ambiente externo. Estes modelos têm um papel importante na pesquisa operacional, aplicado a probabilidade, gestão da ciência e teoria das filas (BLOM et al., 2013; LIU & YU, 2016). Os sistemas de filas possuem várias aplicações práticas, podem apresentar vários servidores com diferentes processos de chegada e intensidades de serviços, e avaliam principalmente processos que envolvem, a produção de multiproduto, as taxas de chegada para diferentes centros de produção e distribuição que podem variar dependendo do tipo de posto de trabalho e de processamento, das condições ambientais e fatores como a experiência do operador (LIU & YU, 2016).

É necessário que a empresa dentro do processo produtivo enxergue e explore as restrições. No qual os recurso tem por dimensão o tempo e pode ser definido como os impactos nos tempos de espera na fila. Para isso, a TOC se vale de nove princípios dentro dos métodos de produção (GOLDRATT, 2003; CORRÊA, 2012).

- Balancear o fluxo ao invés da capacidade;
- A utilização de um recurso não gargalo não é determinada por sua disponibilidade, mas por alguma outra restrição do sistema;
- Utilização e ativação de um recurso não são sinônimos;
- Um minuto ganho em um recurso gargalo é um minuto ganho em todo o sistema;
- Um minuto ganho em um recurso não gargalo não é nada, pois o recurso que limitará a capacidade do sistema é o recurso gargalo;
- O lote de transferência, não deveria ser igual ao lote de processamento, logo o intuito de se ganhar tempo e/ou capacidade na operação gargalo;
- O lote de processamento deve ser variável e não fixo;
- Os gargalos não só determinam o fluxo, mas também definem seus estoques; e
- A programação de atividades e a capacidade produtiva devem ser consideradas simultâneas e não sequencialmente.

O processo de decisão Markoviano (PDM) representa de fato o modelo padrão para tomada de decisões sequencial em problemas de planejamento probabilístico, isto é, problemas de tomada de decisão sequencial. No qual modela a interação entre um agente e seu ambiente. Em cada fase, o agente decide executar uma ação com efeitos probabilísticos, que leva o agente a um estado futuro, e este ganha uma recompensa. O objetivo do agente é maximizar a recompensa esperada sobre uma sequência de ação (PUTERMAN, 1994). Modelos estocásticos que tratam as transições entre os estados como um processo de Markov, ou seja, um processo no qual a probabilidade de passar de

um estado para o outro depende apenas no estado atual, têm sido usados para explorar um amplo comportamento entre o agente e o ambiente, em sistemas dinâmicos (JIMOH & WEBSTER 1996; JACOBY et al. 2012).

A esperança (E) é considerada uma função de probabilidade $P(*)$ e uma variável aleatória discreta X , a esperança de X , denotada por $E[X]$, é a soma ponderada dos valores que a variável pode assumir, em que os pesos são obtidos a partir da função de densidade de probabilidade. O conjunto de medidas de probabilidade, especificar um valor preciso de probabilidade para cada evento ou para cada ocorrência dos valores de uma variável aleatória parece ser fácil, no entanto, em alguns casos, essa é uma tarefa difícil ou mesmo impossível. Uma forma de contornar essa dificuldade é especificar a probabilidade, usando um conjunto de restrição (COZMAN, 2000, 2005). A teoria de probabilidade está relacionada com a teoria de decisão (BERGER, 1985). Um tomador de decisão tem um conjunto de ações a serem consideradas, cada uma produz recompensas diferentes em diferentes estados. A habilidade de planejar tarefas é um aspecto fundamental do comportamento inteligente, e são desenvolvidos principalmente para soluções em automação industrial, como um dos principais objetivos da pesquisa realizada na área de inteligência artificial (RUSSELL & NORVIG, 2002). Em planejamento, a forma com que um sistema evolui a cada ação executada, chamada de dinâmica das ações, pode ser: determinística, não-determinística ou probabilística. Enquanto os modelos determinísticos não modelam incerteza no efeito das ações (executar uma ação em um determinado estado sempre leva o agente a um único estado) os modelos não-determinísticos e probabilísticos modelam diferentes formas de incerteza. (TREVIZAN et al., 2007).

Os estudos de otimização da produção assume como perfeita as informações históricas de demanda ou consumo para o horizonte de planejamento futuro (KONTU et al., 2013). Os problemas de planejamento de produção foram abordados por vários fluxos diferentes de pesquisa, cada uma delas destacando certos aspectos do problema e, portanto, diferentes modelos matemáticos. Diante dos problemas enfrentados na indústria em toda a sua complexidade e generalidade. Na prática, a função de planejamento de produção, muitas vezes combinar vários modelos matemáticos diferentes (KEMPF, 2011). Além disso, é possível formular o problema de planejamento de produção de formas diferentes, dependendo do período de tempo e o nível de agregação de informação envolvida (BITRAN & TIRUPATI, 1993). Em nossa pesquisa, visa focar uma formulação limitada, a de como liberar o agente em um estado, em um sistema de produção em função de tempo, a fim de coincidir com a sua saída, buscando de alguma maneira a situação ótima ou quase ótima.

O tempo de ciclo é definido como o tempo que decorre entre uma unidade de trabalho (estado) que está sendo liberado para um sistema de produção e sua saída do sistema como um produto acabado. Em um sistema de produção o tempo de ciclo de um determinado trabalho (estado) é uma variável aleatória cuja distribuição depende potencialmente das incertezas de um aumento no ambiente de produção, tais como atraso de insumos, tempos de processo, falhas de máquina. Modelos de fila (BUZACOTT & SHANTHIKUMAR, 1993; HOPP & SPEARMAN, 1996), modelos de simulação (ATHERTON & DAYHOFF, 1986; ANKENMAN et al., 2011) e à observação empírica são todas de acordo em que a distribuição do tempo de ciclo também vai depender da utilização média dos meios de produção. Com isso cria uma dificuldade central para o sistema de planejamento de produção. Que precisam considerar o tempo de ciclo, na qual a distribuição do tempo de ciclo é determinada para um grau considerável de utilização do recurso envolvido, que, por sua vez, é determinada pelas decisões de liberação feitas pelos tempos de ciclo de planejamento do sistema. No entanto, os tempos de ciclo são determinados na prática por interações complexas entre vários processos estocásticos, como demanda do cliente, falhas no equipamento, e a chegada de trabalho no setor de máquinas dentro do sistema ao longo do tempo (ANKENMAN et al., 2011).

Modelos de programação matemática têm-se centrado na alocação da capacidade de recurso limitado entre os diferentes produtos ao longo do tempo. Assumindo que todas as entradas são determinística, levando a formulação como programação linear inteira ou mista (Voß & WOODRUFF, 2006; POCHET & WOLSEY, 2006; HACKMAN, 2007; MISSBAUER, (2011)). Estes modelos determinísticos foram ampliados para incorporar incertezas na produção e na demanda. Com proposta de aplicação de modelos de programação estocástica baseada em cenários (ESCUADERO et al., 1993; HIGLE & KEMPF, 2010). A principal dificuldade com esta abordagem é o crescimento no tamanho dos modelos com o aumento do número de tempo de decisão e variáveis aleatórias. Uma variedade das abordagens de otimização consistentes têm sido propostas, na qual se procura um plano de produção que irá fornecer uma solução satisfatória ao longo de um conjunto restrito de resultados em função do tempo (PRÉKOPA, 2013; AOUAM & UZSOY, 2015). Outra extensão dos modelos de programação matemática tem sido no sentido de representar explicitamente a dependência entre os tempos de ciclo e decisões de planejamento, tomada de tempos de ciclo endógenas para os modelos de planejamento (Pahl et al., 2007). A carga de trabalho planejado, geralmente é calculado a partir de um conjunto de variáveis de estado, como a quantidade total de trabalho disponível para o recurso no período ou do processo no período. Possível de determinar os tempos de liberação mais eficientes para uma seqüência fixa de trabalho usando uma abordagem computacional de simulação e otimização (LIU et al., 2011).

3.3 Simulação, otimização e modelo estatístico na aquicultura

Nos últimos anos, muitas aplicações de modelos matemáticos foram para a gestão da aquicultura (LEUNG, 1986; PIEDRAHITA, 1988; SPARRE, 1976). Em geral apresentam diferentes abordagens como período de alimentação, tempo de colheita (ARNASON 1992; BJORN DAL 1988; HEAPS 1993). Modelo para simulação e gestão otimizada na piscicultura do salmão (BJORN DAL, 1990). Sistema de gestão da produção foi modelado com uma abordagem dinâmica de decisão de Markov para camarão (*Palaemon Serratus*) (LEUNG & SHANG, 1989). Métodos semelhantes foram adotados para a otimização do planejamento da produção na aquicultura envolvendo diferentes espécies, modos de operação e condições locais. Alguns estudos foram com gaiola de rede marinha (FORSBERG, 1996; PETRIDIS & ROGDAKIS, 1996; FORSBERG & GUTTORMSEN, 2006; HERNANDEZ et al., 2007), e envolvendo outros sistemas como sistema de recirculação em aquicultura (RAS) (HALACHMI et al., 2005; HALACHMI, 2007), ou tanques fertilizados também são considerados (YI, 1998). Modelos dinâmicos baseados em equações diferencial (COREY et al, 1983; LUPATSCH & KISSEL, 1998; HERNÁNDEZ et al., 2003) ou processos de Markov (FORSBERG, 1996) para descrever a população das espécies e teoria das filas (HALACHMI, 2007) e um ótimo controle (HERNÁNDEZ et al., 2007) têm sido usados para resolver problemas, levando em consideração várias condições de restrição (limitações), tais como a temperatura (CACHO et al., 1991; HERNÁNDEZ et al., 2007) e preço de mercado (FORSBERG e GUTTORMSEN, 2006). E principalmente tomada de decisão na gestão envolvendo tempo de alevinagem e despesca (FORSBERG, 1996), bem como o consumo de ração (HERNÁNDEZ et al., 2007), E considerando um único peso alvo para despesca (PETRIDIS & ROGDAKIS, 1996; HERNÁNDEZ et al., 2007). E ainda, visando explicar processos estocásticos dinâmicos de uma maneira apropriada para aquicultura buscando diferente estratégia de ciclo de produção e preço de mercado simultaneamente, com tomada de decisão com potencial de comercialização e rentabilidade em relação ao tamanho do peixe com sucessivas despescas.

- Um processo estocástico é uma família de variáveis aleatória $\{X(t), t \geq 0\}$ onde t é o parâmetro de tempo. Os valores assumidos pelo processo são chamados de estados, e o conjunto de valores possíveis é chamado o espaço de estado (QIU, & PEDRAM, 1999; TIRDA D et al., 2016).
- Um sistema em aquicultura modelado assume que o sistema está incorporado num ambiente controlado, no qual um lote de alevino entra no tanque com menor biomassa até atingir sua capacidade limite, entre as sucessivas fases de crescimento. O sistema constitui uma fila com processos estocásticos, na qual, a chegada e saída no sistema seguem uma distribuição

de Poisson e distribuição exponencial respectivamente. A disciplina da fila segue uma ordem FIFO (*first in, first out*). E o problema de gerenciamento é encontrar o melhor conjunto de ação e estado, de tal forma, que se minimize o consumo ou maximize a produção, sujeito a restrições de desempenho (MAHABHASHYAM, & GAUTAM, 2005; CORDEIRO & KHAROUFEH, 2012).

O aperfeiçoamento na otimização com controle rigoroso ao longo de todo o processo, é maior na produção de peixes em sistema de recirculação em aquicultura intensiva (RAS), e tende alcançar uma economia considerável de uso de água e terra, com estruturas para produzir uma determinada quantidade de peixes (Hamlin et al., 2008), e com reduzido desperdício de efluentes (TIMMONS et al., 2001), mantendo a rastreabilidade do produto (JAHNCKE & SCHWARTZ, 2000; SMITH, 1996). Sua rentabilidade se baseia na maximização da produção de biomassa por unidade de volume do espaço de criação (BRUNE et al., 2003; SUMMERFELT et al., 2009). E as incertezas inerentes a este sistema estão relacionadas com uma mudança no tempo de crescimento dos peixes, por várias razões: (1) mudanças genéticas; (2) mudanças na ração; (3) mudanças no manuseio dos peixes pela gestão na fazenda; (4) melhorias no biofiltros, fornecimento de oxigênio e outros fatores que afetam a qualidade da água; (5) o estresse e doença; (6) mudanças nos procedimentos de trabalho, envolvendo lote de alevinos e tempo de chegadas; e (7) tempo de despesca de peixes para o mercado. Assim, uma mudança em um parâmetro estocástico (tempo de crescimento do peixe) aumenta a probabilidade de falha do processo e conseqüentemente perda de produção.

Um dos principais obstáculos para o desenvolvimento sustentável da aquicultura tem sido a capacidade para controlar o processo de produção (ASCHE, 2008). E para estabelecer aumento de produtividade e, conseqüentemente, da rentabilidade, a implantação de um sistema de ciclos de cultivo, com cuidadoso planejamento e controle de cada etapa do processo produtivo deve ser estabelecido, levando em consideração aspectos como: (i) otimização do layout dos tanques: diz respeito às dimensões e disposição na fazenda (SUMMERFELT et al., 2009; BRUNE et al., 2003); (ii) definição do balanceamento da produção nos tanques: tem haver com princípio da teoria das restrições onde preconiza balancear o fluxo de produção de forma contínua, em relação ao tempo de crescimento do peixe (HALACHMI et al., 2000; GROSS et al., 2009); (iii) determinação da frequência de chegada de alevinos: esta relacionada com período de tempo do peixe no tanque nas sucessivas fases de crescimento (WINSTON, 2004; HALACHMI, 2007); (iv) definição do tamanho do lote: leva em conta técnica e fatores biológicos da espécie (SUMMERFELT et al., 1993; PEACOR et al., 2007b; GASCA-LEYVA et al., 2008; CAVERO et al., 2009); e, (v) otimização do número de tanques: leva em consideração a utilização de modelos matemáticos e simulação por

computador para o volume de produção anual (PIDD, 1992; WANG et al., 2011). Além de incluir critérios para aumentar o volume de negócios (GROSS, 2008).

4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

4.1 Área de estudo e obtenção dos dados

Os dados zootécnicos usados no modelo foram coletados na fazenda Ecology Pescado, localizada no Km 11 do Ramal do Banco - Rodovia AM 010 Km 127, município de Rio Preto da Eva, próximo de Manaus - Amazonas, Brasil.

Figura 1. Localização geográfica da área de estudo. (Latitude Sul: -02 46' 41,93 Longitude Wg' -59 21' 53,71)



Fonte: Figura adaptada do Google Earth®

A avaliação foi realizada durante três semestres de cultivo que se estendeu de abril/2012 a novembro/2013, e englobou as fases de crescimento entre alevinagem e engorda da espécie *C. macropomum*. Inicialmente, os alevinos possuíam entre 1,5 e 2,0 g e foram dispostos em dois tanques em lotes com 19.200 peixes. E alimentados com ração comercial com 36% de proteína bruta à 5% da biomassa. Esta etapa foi denominada de fase I – alevinagem e teve duração de 50 dias. Após essa fase, os lotes foram distribuídos em partes iguais, sequencialmente em oito tanques de engorda e alimentados com ração comercial com 28% de proteína bruta à 3% da biomassa, com despesca total após 100 dias definido como fase II. Os tanques em escala comercial com área padronizada de 3.200 m² e 1,5 m de profundidade na parte mais profunda. O volume de negócio atual na fazenda visava atender a demanda para frigoríficos, que preferem peixes despescados com peso de 0,5 kg.

4.2 Sobre a espécie

A espécie *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1818), conhecida vulgarmente como tambaqui, pertence à Ordem Characiformes e à Família Serrasalmidæ (MIRANDE, 2010). Quando adulto alcança porte máximo em torno de 100 cm de comprimento e peso superior a 30 kg (Araújo-Lima & Goulding, 1998). Seu comportamento alimentar varia ontogeneticamente de zooplantófago para onívoro, com tendência a frugívoro (Carvalho, 1981; Araújo-Lima & Goulding, 1998). É um peixe nativo da bacia amazônica e do Orinoco. Apresenta comportamento migratório sazonal para reprodução e biologia especialmente adaptada às condições especiais encontradas nos diversos ecossistemas amazônicos (Araújo-Lima & Goulding, 1998; Ferreira et al., 1998; Val et al., 2004). É principal espécie nativa cultivada no Brasil e em alguns países da América Latina, por apresentar grande potencial para essa atividade e possuir boas qualidades zootécnicas (GRAEF, 1995; GOULDING & CARVALHO, 1982; SAINT-PAUL, 1986; SOUSA & FREITAS, 2010 BARROS & MARTINS, 2012).

4.3 Os parâmetros de desempenho zootécnicos foram estimados conforme a metodologia a seguir:

a) Sobrevivência -
$$S(\%) = \frac{N_f}{N_i} \times 100$$

b) Peso médio -
$$P_m(g) = \frac{\sum P(g)}{N}$$

c) Ganho em peso médio diário -
$$GPD (g) = \frac{P_f - P_i}{N \text{ de peixes} \times N \text{ de dias}}$$

d) Conversão alimentar aparente -
$$CAA = \frac{CR (kg)}{GBiom (kg)}$$

e) Densidade -
$$D (kg/m^3) = \frac{Biom (kg)}{V (m^3)}$$

Onde:

N = Número de peixes

N_f = Número de peixes no final do experimento

N_i = Número de peixes no início do experimento

P = Peso

P_m = Peso médio

GPD = Ganho de peso diário

Biom = Biomassa

GBiom = Ganho em biomassa

CR = Consumo de ração

P_f = Peso final

P_i = Peso inicial

V = Volume do tanque

D = Densidade

CA = Conversão alimentar

S = Sobrevivência

4.4 Análises estatísticas

Foi utilizado o método de análise de variância de medidas repetidas para avaliar os parâmetros zootécnicos: Biom, GBiom, CR, S, P_m, GPD, CA e D. Quando a hipótese H₀ foi rejeitada, o teste de Tukey foi usada para comparação pareada das médias. Valores de p<0,05 foram considerados significativos.

4.5 Parâmetros técnico/econômicos do cultivo

As informações de preços e custos dos itens considerados na análise econômica foram obtidas junto à administração da fazenda Ecology Pescado, sobre os componentes que exercem maior influência sobre os custos de produção, com base de tempo do projeto a partir do ano um, com horizonte de tempo de exploração de quinze anos, e adaptada conforme a metodologia proposta por Silva et al. (2003). Em que se considera apenas o custo operacional parcial (COP), definido como valor gasto com ração e alevinos, salário, energia e manutenção, incluindo a

depreciação por tanque. Que será descontada da receita bruta (RB) gerada com a venda dos peixes vivos (*in natura*) no local da produção, obtendo o lucro líquido parcial.

4.6 Curva de crescimento estimada em peso para o tambaqui

Para estimar a curva de crescimento do tambaqui, mensalmente foram amostrados 100 indivíduos e medidos o peso total (Wt), por meio de balança semi-analítica com precisão de 0,01g, comprimento total (Lt) e comprimento padrão (Ls), utilizando-se ictiômetro com escala em mm. O gráfico gerado foi construído usando estimação não-linear, com o algoritmo Quasi-Newton, no software Statistica 9.0 (StatSoft, 2009).

5. CAPÍTULO 1 - OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA TAMBAQUI EM PISCICULTURA SEMI-INTENSIVA NA REGIÃO NORTE DO AMAZONAS*

*artigo preparado para submissão na revista: European Journal of Operational Research

Craveiro, J. M. C.¹, Salvatierra, M. J.², SILVA NETO, G. C.³, Tribuzy, Karla.⁴, Freitas, C. E. C.¹

¹Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Ciências Agrárias, Dep. Ciências Pesqueiras – Av. General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I, (<http://www.ppgcipet.ufam.edu.br>) Cep: 69077-000 Manaus, AM (Brazil). E-mail: jgabael@yahoo.com.br, (Craveiro, J.M.C.).

²Universidade Federal do Amazonas, IComp - Cep: 69077-000 Manaus, AM (Brazil).

³Universidade Federal do Amazonas, DEMEC - Cep: 69077-000 Manaus, AM (Brazil).

⁴Universidade Federal do Amazonas, ICE - Cep: 69077-000 Manaus, AM (Brazil).

European Journal of Operational Research

(<http://www.journals.elsevier.com/european-journal-of-operational-research>)

ISSN: 0377-2217

Fator de impacto: 2,358

Qualis: ²A1; ^{1,3,4}B1

Resumo

A proposta do nosso estudo, foi levantar a questão sobre qual mix de peso para o mercado, representa a maximização da produção para o cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanque semiescavado. Sendo um dos sistemas produtivos da aquicultura amplamente utilizada na piscicultura semi-intensiva na Região Norte do Amazonas. Na fazenda, o volume de negócio atual visava atender a demanda para frigoríficos, que preferem peixes despescados com peso de 0,5 kg. Com base na situação real, o algoritmo matemático gerados, foram simulados com cenários *layouts* para 5 e 10 tanques (representando pequeno e grande piscicultor). A capacidade de biomassa em ambos foi igual a 2400 kg, definida pelo oxigênio dissolvido (OD) para o peixe no tanque, e a taxa de mortalidade foi 1% em cada fase. A transição entre as fases de crescimento um processo estocástico que satisfaz a propriedade de Markov. Que descreve uma fila sequencial através das fases de crescimento em relação ao tempo, com peso alvo para o mercado. Com a premissa de despesa mix de peso com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg foi possível definir o equilíbrio entre a entrada e saída do sistema que otimizam a produção. O resultado gerado na otimização, obteve para o planejamento de despesa de biomassa do tambaqui, a maior rentabilidade de R\$ 32.379,10 e R\$ 51.846,90 para cenários com layout 10 tanques, com despesa mix de peso alvo com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg respectivamente. A expressão “ $-C_f(5 + 2t_2 + 6t_3 - 2t_2t_3)$ ”, sendo $t_1, t_2, t_3 \in \{0, 1\}$ definindo uma variável binária, garante exatamente a quantidade de meses que serão contadas para se descontar o custo fixo mensal C_f , em relação ao tempo de ciclo, que durou 5, 7 e 11 meses. Algumas limitações devem ser observadas, o algoritmo matemático para otimização do mix de peso foi definida com o tempo na fase de alevinagem fixada em 50 dias, e foram identificados *gaps* (lacunas de tempo) entre as sucessivas fases factível de investigação.

Palavras chaves: Otimização de produção, sistema semi-intensivo, desempenho econômico, *Colossoma macropomum*

Abstract

The purpose of our study was to raise the question of what weight mix for the market, is the maximization of production for the cultivation of tambaqui (*Colossoma macropomum*) in semiescavado tank. It is a productive aquaculture systems widely used in semi-intensive fish farming in the north of the Amazon. On the farm, the current business volume was intended to meet the demand for fridge, preferring harvest fish weighing 0.5 kg. Based on the actual situation, and mathematical algorithm generated, were simulated with scenarios layouts to 5 and 10 tanks (representing small and large fish farmer), and the ability of biomass to both equal to 2400 kg, set by the dissolved oxygen (DO) for fish in the tank, the mortality rate was 1% in each stage. And the transition between stages of growth, satisfies the Markov property. Its design flow of simulated fish with target weight to market weight with the premise fish removal mix with 0.5 kg, 1 kg and 0.5 kg, 1 kg, 2 kg. Describe a sequential queue through the stages of growth with respect to time, a possible balance between inlet and outlet. The result generated, with prices considered for sale in the simulation are independent of demand, as follows: R\$ 4.00/kg; R\$ 5.00/kg; R\$ 6.50/kg for fish with 0.5 kg; 1 kg and 2 kg, respectively, and feed conversion ratio of 1:1, 1.2:1 and 1.6:1 and ration price of R\$ 1.44/kg. Obtained for planning fish removal in order to optimize the tambaqui of biomass production, higher profitability of R\$ 32,379.10 and R\$ 51,846.90 was for scenarios layout with 10 tanks with target weight of fish removal mix with 0.5 kg, 1 kg and 0.5 kg, 1 kg, 2 kg respectively. With the expression “ $-C_f(5 + 2t_2 + 6t_3 - 2t_2t_3)$ ”, where $t_1, t_2, t_3 \in \{0, 1\}$ defining a binary variable. That ensures exact amount of months are counted to discount the monthly flat fee C_f in relation to the cycle time, which in our case, 5, 7, and 11 months. Some limitations must be observed, the mathematical algorithm to weight the mix optimization was set to the time in the nursery stage set at 50 days, and gaps have been identified (time gaps) between successive phases feasible research.

Key-words: Optimization of production, semi-intensive system, economic performance, *Colossoma macropomum*

5.1 INTRODUÇÃO

A aquicultura mundial tem se desenvolvido explorando diversas espécies e empregando diferentes processos produtivos (FAO, 2014). Em que podemos destacar dois subsetores distintos. O primeiro grupo inclui fazendas comerciais que primariamente usam métodos intensivos e superintensivos para produzir produtos de médio e alto valor agregado para os mercados regionais ou globais. O outro grupo abrange a exploração familiar e cooperativas com praticas extensivas e semi-intensivas, com produção de espécies de baixo valor destinados à subsistência do agregado familiar ou mercados locais. E competem com setores da agricultura por recursos ambientais escassos, na China e outras partes da Ásia, por exemplo, muitas operações agrícolas de pequena escala estão se intensificando e competindo por recursos de terra e água cada vez mais valiosos (NAYLOR et al., 2000, 2009). Diante deste fato, a busca por soluções que melhorem o desempenho econômico da produção aquícola, levando em consideração, a viabilidade biológica e uso de tecnologias para implementar a produção em escala comercial é importante (BJORNDAL, 2004).

A expectativa dos piscicultores é maximizar a produção de peixe por ano, mas para isso, é necessário o desenvolvimento mais eficiente do sistema de gestão de produção. Nesse sentido, algumas restrições importantes devem ser consideradas no planejamento e gerenciamento desta atividade, por exercerem influencia no custo de produção em relação ao tempo, dentre as quais podemos destacar: (i) quantidade de ração consumida; (ii) frequência de entrada de alevinos, (iii) tempo de engorda; (iv) tamanho do lote; (v) peso ideal para o mercado com despesca que maximize o lucro do empreendimento. Algumas metodologias para resolver estes problemas no sistema de gestão industrial, têm se desenvolvido através da utilização de métodos como pesquisa operacional (PO) e teoria das filas (TF) (BJORNDAL, 2004; HERNANDEZ, 2007; LAW & KELTON, 2000; BANKS, 1998). E proporcionado soluções viáveis para problemas de planejamento em processos aquícolas. Tendo como premissa que os tanques descrevem uma sequência de filas, sendo o tempo de crescimento do peixe um evento estocástico, discreto variável no tempo, considerado um processo de Markov (SPARRE, 1976; WINSTON, 2004; SUMMERFELT et al., 2009; HALACHMI, 2012). Alguns estudos utilizando estes métodos mostraram que soluções para problema de gestão, podem ser obtidas com modelos matemáticos e pode ser resolvidos através de técnica computacional (PIDD, 1992; KNILL, 1994, SILVEIRA et al., 2013).

Com este propósito, buscou levantar a questão sobre qual mix de peso para o mercado representa a maximização da produção para o cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanque semiescavado. No qual foi avaliado um cenário real de layout de tanques semiescavados para o cultivo de tambaqui, visando obter um algoritmo matemático para simular as combinações de

mix de peso e demanda de mercado que maximizem a produção de biomassa por tanque. Sendo um dos sistemas produtivos da aquicultura amplamente utilizado na piscicultura semi-intensiva na Região Norte do Amazonas. Informações inerentes a interações entre as variáveis de decisão e fatores biológicos da espécie são importantes.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Sobre o peixe e obtenção dos dados

Para quantificar os parâmetros de entrada do modelo, foram coletados dados zootécnicos na fazenda Ecology Pescado, localizada no Km 11 do Ramal do Banco - Rodovia AM 010 Km 127, município de Rio Preto da Eva, Amazonas, Brasil. Durante um período de três semestres de cultivo que se estendeu de abril/2012 a novembro/2013, e englobou as fases de crescimento entre alevinagem e engorda. Inicialmente, os alevinos possuíam entre 1,5 e 2,0 g, dispostos em dois lotes de 19.200 peixes, alimentados com ração comercial com 32% de proteína bruta à 5% da biomassa. Esta etapa foi denominada de fase I – alevinagem e teve duração de 50 dias. Após essa fase, os lotes foram distribuídos em partes iguais, sequencialmente em oito tanques de engorda, alimentados com ração comercial com 28% de proteína bruta à 3% da biomassa, com despesa total após 100 dias definido como fase II. Os tanques em escala comercial, com área padronizada de 3.200 m² e 1,5 m de profundidade. O volume de negócio na fazenda visava atender a demanda para frigoríficos, que preferem peixes despescados com peso de 0,5 kg. Com base na situação real, foram simulados cenários de *layouts* de tanques desenhados, com a capacidade de biomassa limite definida pela disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD) para o peixe no tanque. O manejo alimentar e o controle dos parâmetros físico-químicos da água seguiram recomendações da literatura (ARAÚJO-LIMA & GOULDING, 1998; KUBITZA, 2000; IZEL & MELO, 2004; CAVERO et al., 2009; GOMES & SILVA, 2009). O cálculo do tempo sugerido que o peixe permanece em cada fase de crescimento no tanque, esta conforme metodologia descrita por Halachmi, (2007) em sistema com recirculação em aquicultura (RAS), e será demonstrado no resultado.

O tambaqui (*Colossoma macropomum*, Cuvier 1818) peixe da ordem Characiformes, pertencente à família Serrasalminidae (GERY, 1977; MIRANDE, 2010) e nativo dos rios Amazonas e Orinoco e seus afluentes. É a principal espécie nativa cultivada no Brasil e em alguns países da América Latina, por possuir boas qualidades zootécnicas (GRAEF, 1995; GOULDING & CARVALHO, 1982; SAINT-PAUL, 1986; SOUSA & FREITAS, 2010; BARROS & MARTINS, 2012).

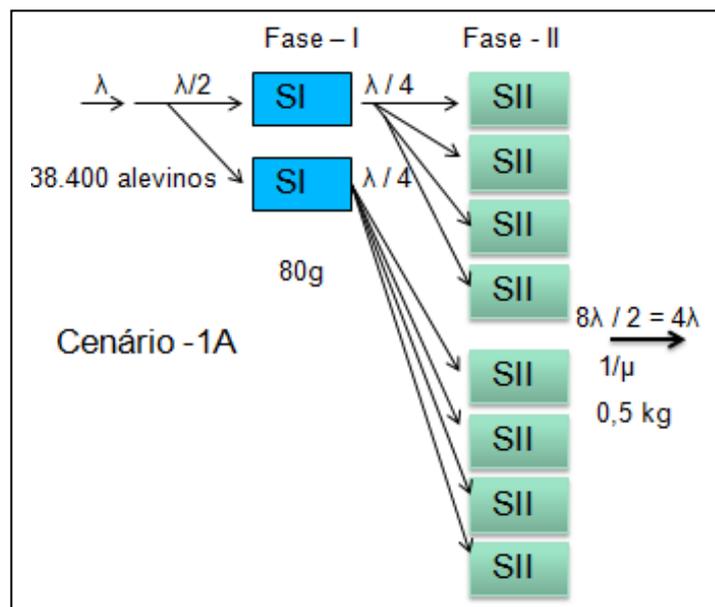
A avaliação econômica foi adaptada conforme a metodologia proposta por Silva et al. (2003), em que se considera apenas o custo operacional parcial (COP), definido como valor gasto

com ração e alevinos, salário, energia e manutenção, incluindo a depreciação por tanque, com horizonte de tempo de exploração de quinze anos. E a receita bruta (RB) obtida com a venda dos peixes vivos (*in natura*) no local da produção, obtendo o lucro líquido parcial.

5.2.2 Conceituando sistema de fila lotes de peixes para simulação

Assumindo que o comprimento dos peixes segue uma distribuição normal, com o coeficiente de variância constante durante todo o período de crescimento. E sua distribuição de tamanho considerada discreta, o crescimento do peixe um processo estocástico variável no tempo, que satisfaz a propriedade de Markov, ou seja, seu estado futuro depende apenas do seu estado atual (SUMMERFELT et al., 1993; FORSBERG, 1996; HALACHMI, 2012; TIRDADE et al., 2016). A transição do fluxo lote de peixe simulado, descrevendo uma fila sequencial através das fases de crescimento nos tanques semiescavados, com característica de um processo dinâmico, que são governados pela teoria da probabilidade (KNILL, 1994; COZMAN, 2000, 2005; JACOBY et al. 2012), capaz de definir um conjunto de estados que podem alcançar e descrever os critérios de suas transições. O tempo uma medida linear através da qual o sistema se movimenta. Assim, quando um lote de peixe, ou entidade cresce ao seu tamanho pré-determinado, libera o tanque ou recurso, e segue para próxima fase (figura 2). Ao final de cada fase de crescimento, um lote é dividido, para que os peixes iniciem com peso correspondente à menor biomassa até atingir seu limite em cada sucessiva fase.

Figura 2. Cenário 1A: corresponde à situação real em um diagrama de transição '2, 8 layout' em tanque semiescavado de escala comercial no interior do Amazonas. Onde λ representa a chegada do lote de peixe passando pelo crescimento inicial na fase I – alevinagem e a taxa de partida para fase II - engorda. Si é a quantidade de tempo gasto esperado por um peixe em fase de crescimento i.



Fonte: autoria própria

Com a função de crescimento da espécie, é possível de estimar a probabilidade do peso de um indivíduo em uma série de transições entre a fase de alevinagem t_0 e fase de engorda t_1 para um determinado momento futuro, ou seja, peso ideal para despesca. Em nosso modelo, a premissa foi atender demandas do mercado em função do tempo, peso médio 0,5kg, 1kg e 2kg para frigoríficos, supermercados e feiras livres respectivamente. O consumo de ração foi proporcional à taxa de conversão alimentar, correspondente a cada peso definida em 1:1; 1,2:1 e 1,6:1 dados obtidos junto administração da fazenda e será uma restrição usada no cálculo da avaliação econômica.

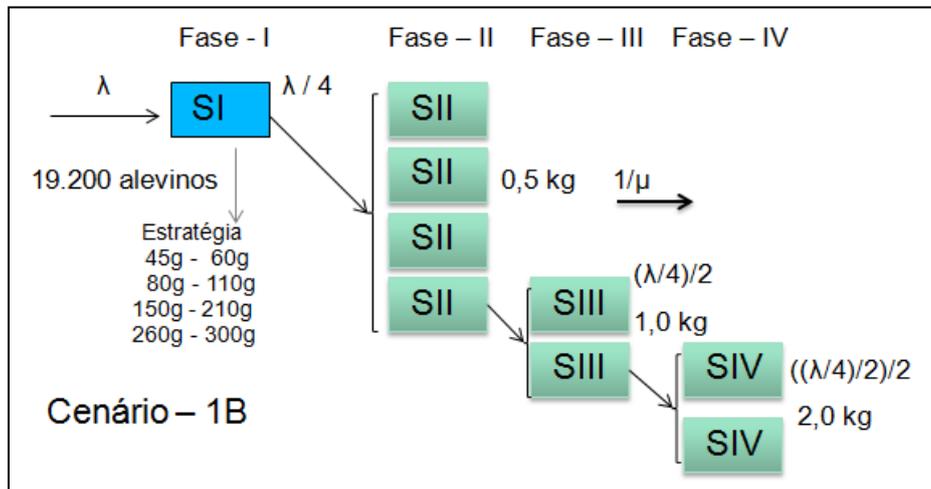
5.2.3 Formulação do sistema de fila lotes de peixes e aplicação em tanque semiescavado

A principal abordagem para resolver problemas de planejamento probabilístico é sua modelagem como um processo Markoviano (HOWARD, 1960; BONET & GEFNER, 2005), em que são feitas hipóteses que a melhor estratégia de ação pode ser tomada conhecendo-se apenas o estado atual do agente e o ambiente é completamente observável (PUTERMAN, 1994; JACOBY et al., 2012; LIU & YU, 2016). Assumindo estas premissas para analisar as fases do crescimento dos peixes nos tanques e tomando como bases a metodologia utilizada por Halachmi (2007), o tempo (em dias) que o peixe leva para crescer durante um ciclo de produção no tanque pode ser representado pela esperança $E(S)$ sendo S um ambiente controlado para o peixe crescer. E chegada de lotes de peixes no sistema dado por λ descrevendo uma distribuição de Poisson (probabilidade de ocorrências de um evento em um intervalo especificado) e saída na despesca dado por μ descrevendo uma distribuição Exponencial (uma variável aleatória contínua de valores não negativos) (KRAJEWSKY et al., 2009; CORRÊA, 2012; HAJI & ROSS, 2015). Onde a utilização do tanque em 100% obtida quando $\rho = \lambda / \mu = 1$. Com isto podemos estabelecer no modelo um equilíbrio entre a entrada lote de peixes alevinos chegando ao sistema igual ou próximo a sua saída $\lambda = \mu$ isto é, despesca para o mercado assumindo que:

$$E(S) = 1/\mu = 1/\lambda \quad (1)$$

Com a composição de vários tanques semiescavados na fazenda, com a taxa de entrada e saída são iguais em cada tanque, o cenário 1B (figura 3) será usado para análise de simulação. E os resultados dos cálculos aplicados em nosso modelo, visando obter λ ótimo para um sistema de fila com transições entre as fases de crescimento, descrito conforme formula geral (Eq. (1)).

Figura 3. Representa cenário 1B, um diagrama de transição '1, 4, 2, 2 layout' em tanque semiescavado. Onde representa a entrada lote de alevinos no sistema, passando pela fase I, e as taxas de partidas para fases de engorda II, III e IV. Si é a quantidade de tempo gasto esperado por um peixe em fase de crescimento i.



Fonte: autoria própria

Para o número de partes em que um lote de peixe é dividido (P), e o número de tanques escavado (c) em uma fase de crescimento onde:

$$\rho = (\lambda / \mu \cdot P / c) \quad (2)$$

Substituindo $\rho = 1$, significa alcançar 100% de utilização do tanque temos:

$$1 / \mu = (1 / \lambda \cdot c / P) \quad (3)$$

Substituindo $S = (1/\mu)$, onde S é tempo esperado que um peixe gasta na fase de crescimento i , obtém-se:

$$S_i = (1/\lambda \cdot c_i / \prod_1^i P_i) \quad (4)$$

$$S_i = 1/(\lambda P_i/c_i) = c_i / (\lambda P_i) \quad (5)$$

Onde S_i é o período na fase de crescimento i , c_i é o número esperado de tanques escavados na fase de crescimento i , P_i é o número de partes em que um lote de peixe é dividido, uma vez que entra em fase de crescimento i , em geral essa divisão de categoria ou triagem, são conhecidas como classificação e ordenação de eventos. Em nosso caso, o lote com $N_1 = 19200$ na fase I é dividido em

partes menores, para fase II, formando P sub-lotes, ou seja, quatro lotes de $N_2 = 4800$ peixes cada, e o número real em categorias foi $P_2 = 2$ será mostrado nos resultados.

Em geral, o período de crescimento completo ΣSi é conhecido e depende de características biológicas da espécie cultivada e de condições locais no sistema de cultivo, como qualidade de água, temperatura, oxigênio, alimentação, manejo, onde:

$$\begin{aligned} \Sigma Si &= \Sigma(1/\lambda \cdot c_i / \prod P_i) \rightarrow \Sigma Si = 1/\lambda \Sigma(c_i / \prod P_i) \\ \rightarrow 1/\lambda &= \Sigma Si / \Sigma(c_i / \prod P_i) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Sigma Si = \Sigma(c_i / (\lambda P_i)) \rightarrow 1/\lambda = \Sigma Si / \Sigma(c_i / P_i) \quad (7)$$

Para um volume de negócios anual projetado, T (tonelada por ano) obtido por:

$$T = \lambda \cdot N_f \cdot B_f = (\Sigma(c_i / \prod P_i) / \Sigma Si) \cdot N_f \cdot B_f \quad (8)$$

Onde λ (lotes por ano) são as taxas de entrada e saída, resultantes do número de lotes de peixe que partem por ano, N_f (peixe) é o número de peixes em um lote no momento do mercado, e B_f (kg) é o peso final do peixe. Para o problema de otimização dado:

$$\max T = \max(\Sigma(c_i / \prod P_i) / \Sigma Si) \cdot N_f \cdot B_f \quad (9)$$

Sujeito às restrições onde:

Σc_i = número de tanques escavado que podem caber em um determinado espaço da fazenda.

D_i = Densidade permitida de biomassa de peixes no final da fase de crescimento de qualquer i , definida no cálculo pela disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD) para o peixe no tanque. No presente estudo considerado 5 mg/l OD.

$\Sigma Si \leq$ período de crescimento total em todas as fases (10)

$B_i = B_{\text{alevino}} + Ct\Sigma Si$, onde biomassa inicial dos alevinos peso corporal do peixe é dependente da taxa de crescimento Ct e tempo no sistema ΣSi .

$c_i = \lambda \cdot S_i \cdot \prod_1^i P_i$, número de tanques de cultura em fase de crescimento i (da Eq. (4))

Os parâmetros de decisão foram nesse caso:

$c_1, c_2, c_3, c_4, S_1, S_2, S_3, S_4, P_1, P_2, P_3, P_4, N, \lambda$.

5.2.1 O modelo de otimização

O efeito estocástico do crescimento do peixe, relacionado aos fatores genéticos e ambientais sob condições ótimas, é considerado como um processo de Markov (SPARRE, 1976; LEUNG & SHANG, 1989; KNILL, 1994). A estratégia de gestão para otimizar a produção de biomassa foi estabelecida determinando a distribuição da variável de decisão no horizonte de tempo (figura 4), para maximizar o lucro, e respeitando a restrição densidade máxima no tanque de 2400 kg. Na piscicultura, muitas decisões estratégicas e operacionais podem ser otimizadas através de modelagem matemática que constitui a base da metodologia da pesquisa operacional (OSMAN & LAPORTE, 1996; BLUM & ROLI, 2003; SILVEIRA et al., 2013). Em nosso estudo, utilizamos modelos de Programação Linear Inteira (PLI), para um problema de Programação Linear (PL) em que todas ou alguma das suas variáveis são discretas, têm de assumir valores inteiros. E Programação Não Linear Inteira (PNLI), onde as variáveis de decisão são as quantidades de peixes de 0,5kg, 1 kg e 2 kg que devem atender o mix de peso alvo para mercado em função do tempo. Onde foram formados dois cenários de 5 tanques e 10 tanques para análise de simulação, assim definidos, pequeno e grande piscicultor respectivamente.

Figura 4. Peso final do tambaqui em função do tempo que corresponde às sucessivas fases, onde as variáveis (t_1 , t_2 , t_3) foram utilizadas na simulação para definir os custos de produção.

t_1	t_2	t_3
5 meses	7 meses	11 meses
0,5 kg	1 kg	2 kg

Fonte: autoria própria

Conforme biologia do tambaqui o crescimento em peso, é alcançado no período previsto, assumindo para simulação, que um lote de peixe com peso alvo 0,5 kg final da fase II, são despesados após 5 meses de produção, e apresentam uma distribuição normal, com coeficiente de variação constante durante todo o período de crescimento. Seguindo o mesmo procedimento para um lote de peixe com peso alvo 1 kg final da fase III e um lote com peso alvo 2 kg final da fase IV, com despesa após 7 e 11 meses respectivamente. Embora os peixes com maior peso sejam vendidos por preços mais elevados, resultará em maior tempo com implicação no aumento do custo mensal de produção. Diante disto, o piscicultor não é capaz de definir qual a melhor estratégia do mix de peso para despesa. Havendo a necessidade de usar um modelo de otimização para resolver este problema (HILLIER & LIEBERMAN, 2006; CORRÊA, 2012; HAJI & ROSS, 2015). Onde a simulação computacional foi escrito no software CPLEX Studio124 (IBM) versão acadêmica.

O algoritmo matemático formulado para análise de simulação está representado (apêndice I), para layout com 10 tanques. E foram formulados outros algoritmos (apêndice II), para layout com 5 tanques, denotando ser proporcional em quantidades, e com premissa de despesa em ambos com mix de peso alvo com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg com objetivo na otimização da produção de biomassa do tambaqui em tanque semiescavado, que maximize o lucro.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 A estabilidade do sistema de fila lote de peixes

Avaliando os resultados de um ponto de vista estatístico, as sucessivas fases de crescimento do tambaqui apresenta um estado de renovação, característico do processo estocástico, onde envolve relação de estimação. Seguindo a metodologia descrita por Halachmi, (2007) para estimar o tempo de espera de estado estável, o cálculo do tempo de espera em que um lote de peixe permanece em cada fase de crescimento no tanque, foi deduzido a partir da característica biológica para a espécie. Nesse caso, o tempo total o somatório dos tempos de espera em cada fase de crescimento do peixe. Em nosso estudo o cálculo serviu como base para balancear o fluxo de produção nas sucessivas fases de crescimento do tambaqui, e estabelecer planejamento estratégico para despesa conforme premissa definida mix de peso alvo para o mercado. Observe que o cenário 1A foi subdividido dando origem ao cenário 1B e formulado inicialmente com 1 (um) tanque de alevinagem e 4 (quatro) tanques para engorda para facilitar entendimento dos cálculos.

O cálculo do número ideal de dias em cada fase de crescimento é sugerido, mas que deve ser entendido pelo gestor, como um parâmetro de decisão para balancear o fluxo de produção no sistema de fila. Considerando principalmente a fase I onde pode reter por mais tempo um lote de peixe, transferindo com peso avançado para fase II. E determinar quando um peixe deve ser movido entre consecutivas fases. Sendo este resultado aplicado para outros cálculos a seguir:

5.3.3 Cálculo do número sugerido em dias para cada fase de crescimento no tanque

Podemos substituir no caso geral, para vários tanques em cada layout, nas Eqs. (4) e (7), e obter os valores numéricos para o *layout* '1, 4, 2, 2': com período de crescimento total do tambaqui $\Sigma Si = 330$ dias; Com número de tanques de cultivo $c_1 = 1$; $c_2 = 4$; $c_3 = 2$ $c_4 = 2$; o número de sub-lotes formados a partir de um lote $P_1 = 1$; $P_2 = 2$; $P_3 = 1$; $P_4 = 1$ obtemos:

$$\text{Eq. 7} \rightarrow 1/\lambda = 330 / (1/1 + 4/2 + 2/1 + 2/1) = 47 \text{ dias.}$$

$$\text{Eq. 4} \rightarrow SI = 1/\lambda \times ci/Pi = 47 \times 1/1 = 47 \text{ dias.}$$

$$SII = 1/\lambda \times c_i/P_i = 47 \times 4/2 = 94 \text{ dias.}$$

$$SIII = 1/\lambda \times c_i/P_i = 47 \times 2/1 = 94 \text{ dias.}$$

$$SIV = 1/\lambda \times c_i/P_i = 47 \times 2/1 = 94 \text{ dias.}$$

Para Eq. (7) com três variáveis, onde c , o número de tanques escavados e P , o número de sub-lotes formados a partir de um lote, considerados parâmetros gerenciais na fazenda (HALACHMI, 2007). E S , o período de crescimento, uma variável biológica que depende de uma variedade de condições, tais como qualidade da água, temperatura, oxigênio, alimentação, característica genética, manejo. Conforme as nossas medições, (figura 2), para o período de crescimento do tambaqui no tempo mínimo de 310 dias e máximo de 330 dias, o resultado na tabela 2 mostra uma redução da produção influenciada pela ação do tempo no período de crescimento total (ΣSi) calculada pelas Eqs. (8) e (9). Como mostrado acima, λ ótimo e S_i garante que todo o sistema será balanceado de forma considerável.

Tabela 2. Redução da produção em '1, 4, 2, 2 layout' pela ação período de crescimento do tambaqui em dias.

Inputs¹ Model outputs².....

growth period	Arrival interval	growth period	growth period	growth period	growth period	Cycles/ year	Turnover
ΣSi	$1/\lambda$	S_i	S_{II}	S_{III}	S_{IV}		(ton/year)
(days)	(days)	(days)	(days)	(days)	(days)		
310	44	44	89	89	89	8,2	84.089
311	44,4	44,4	89	89	89	8,2	84.220
312	44,6	44,6	89	89	89	8,2	83.950
313	44,7	44,7	89	89	89	8,2	83.682
314	44,9	44,9	90	90	90	8,1	83.415
315	45,0	45,0	90	90	90	8,1	83.150
316	45,1	45,1	90	90	90	8,1	82.887
317	45,3	45,3	91	91	91	8,1	82.626
318	45,4	45,4	91	91	91	8,0	82.366
319	45,6	45,6	91	91	91	8,0	82.108
320	45,7	45,7	91	91	91	8,0	81.851
321	45,9	45,9	92	92	92	8,0	81.596
322	46,0	46,0	92	92	92	7,9	81.343
323	46,1	46,1	92	92	92	7,9	81.091
324	46,3	46,3	93	93	93	7,9	80.841
325	46,4	46,4	93	93	93	7,9	80.592
326	46,6	46,6	93	93	93	7,8	80.345
327	46,7	46,7	93	93	93	7,8	80.099
328	46,9	46,9	94	94	94	7,8	79.855
329	47,0	47,0	94	94	94	7,8	79.612
330	47,1	47,1	94	94	94	7,7	79.371

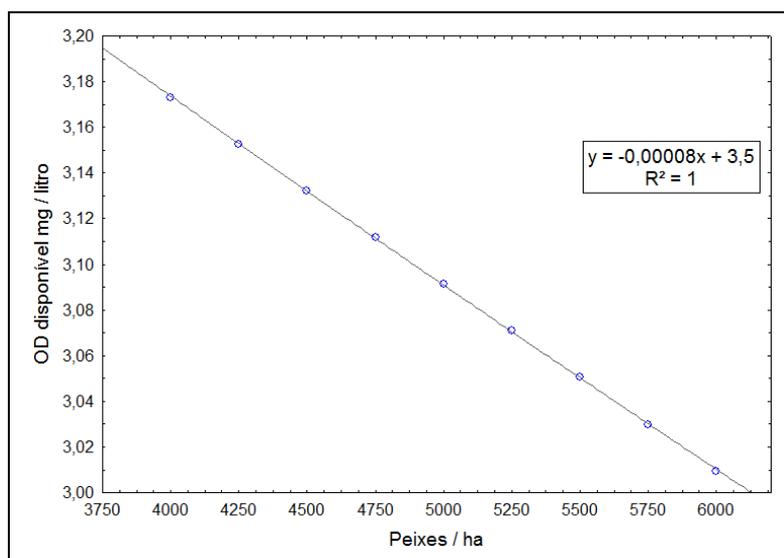
Fonte: Adaptado de HALACHMI, 2007

¹Conforme medições realizadas o período de crescimento total (ΣSi), neste caso foi entre 310-330 dias; ²Os resultados do modelo foram calculados de acordo com as Eqs. (8) e (9), onde o número de tanques em cada fase de crescimento no '1, 4, 2, 2 layout', foram $c_1 = 1$; $c_2 = 4$; $c_3 = 2$ $c_4 = 2$; o número de sublotes formados a partir de um lote $P_1 = 1$; $P_2 = 2$; $P_3 = 1$; $P_4 = 1$, o número de peixes inicial foi 19200.

5.3.2 Critério do número de peixe em cada lote

Para os tanques semiescavados no presente estudo, construídos cada um com volume 4800 m³ (40x80x1,5m). A taxa de respiração da espécie *Colossoma macropomum* é conhecida 250 mgO₂/kg/h. E usada como parâmetro no cálculo da biomassa máxima em função do tempo, que é determinada pelo critério: densidade de estocagem pela disponibilidade de OD para o peixe no tanque em cada fase de crescimento. Observando a influência exercida com o aumento na quantidade de peixes no ambiente, causa redução de OD a um nível crítico 3 mg/l para espécie tambaqui (figura 5) (GOMES et al., 2006; VAL & ALMEIDA-VAL, 1995). A taxa de mortalidade foi de 1% em cada tanque, a temperatura média da água dos tanques escavados coletados ficou entre 28,03 °C a 29,92 °C. O manejo alimentar e o controle dos parâmetros físico-químicos da água seguiram recomendações da literatura (ARAÚJO-LIMA & GOULDING, 1998; KUBITZA, 2000; IZEL & MELO, 2004; CAVERO et al., 2009; GOMES & SILVA, 2009).

Figura 5. Influência da quantidade de peixes/ha sobre OD disponível mg/l dado pela equação $y = -0,00008x + 3,5$ resultado da pesquisa com tambaqui onde, y= Oxigênio Dissolvido, x= quantidade de peixe.



Fonte: autoria própria

A tabela 3 mostra os parâmetros usados no cálculo para planejamento da produção por tanque, Esta é uma restrição importante que deverá ser utilizada pela gestão da fazenda para balancear o fluxo de produção no sistema de tanques semiescavados, nas sucessivas fases de crescimento. Com limitação da biomassa de 2400 kg por tanque, é demonstrado na última coluna $(7200000/250)/12=2400\text{kg}$. É possível alteração nas proporções em: 1,5x; 2x; 2,5x somente a área do tanque na fase de alevinagem, permitindo como estratégia, transferir peixes com peso avançado em relação ao tempo de equilíbrio do sistema, ou seja, $1/\mu = 1/\lambda$.

Tabela 3. Biomassa máxima de tambaqui pela disponibilidade de OD para o peixe no tanque

Volume (m ³)	Litros	OD (mg/L)	Total OD	% OD consumo	OD p/ peixe	Consumo mgOD/kg Biomassa/h	Período (h)	Capac. Biomassa (kg)
4800	4800000	5	24000000	70,0	7200000	250	12	2400
7200	7200000	5	36000000	70,0	10800000	250	12	3600
9600	9600000	5	48000000	70,0	14400000	250	12	4800
12000	12000000	5	60000000	70,0	18000000	250	12	6000

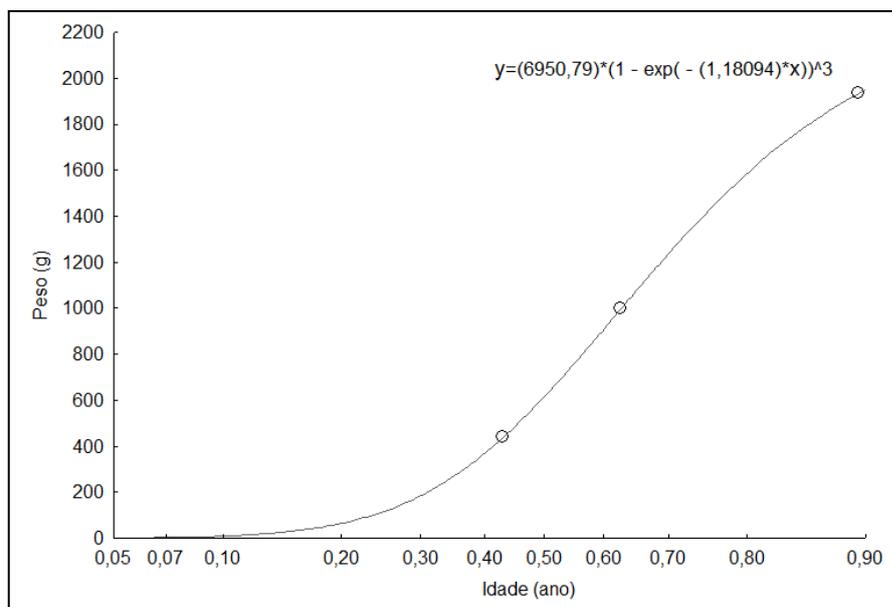
Fonte: autoria própria

Com a composição de vários tanques semiescavado na fazenda conforme *layout* '1, 4, 2, 2' (figura 3), um lote de peixes com densidade $D = 19200$ como sugestão alterando em 2,5x a área tanque alevinagem, um peixe pode permanecer no tanque fase I até atingir capacidade de biomassa pela disponibilidade OD com o peso 312 g ($6000 \text{ kg}/19200 \text{ peixes} = 312 \text{ g/peixe}$). Em seguida transferido para as próximas fases. Atenção, a taxa de mortalidade 1% em cada fase não foi considerada no cálculo acima. Assim, em nosso estudo a taxa de mortalidade soma 4%, a compra de alevinos foi aumentada por um fator de 1,04 que corresponde a 768 unidades para compensar perda de peixe no ciclo de produção.

5.3.4 Simulação e otimização da produção tambaqui com mix de peso alvo para mercado

Os cenários com mix de peso para despesca foram elaborados respeitando o critério capacidade de biomassa limite 2400 kg por tanque, dado pela restrição OD. O período de crescimento ótimo, ao final de cada fase, sugere mover um lote de peixe ou fazer sua despesca para o mercado conforme resultado obtido pela Eq. (4). Em nosso estudo o tempo foi 47, 141, 235 e 330 dias, obtendo uma classificação do peixe em relação ao tempo (idade do peixe) com peso alvo estimado pela curva de crescimento em peso do tambaqui (figura 6) definida pela equação $y=(6950,79)*(1-\exp(-(1,18094)*x))^3$ projetando peixes com média de peso 0,080 kg, 0,487 kg, 1,08 kg, 2,15 kg. Obtendo o critério de transferir com tempo de 47 dias e 0,080 kg da fase I para fase II, mover com 141 dias e 0,487 kg da fase II para fase III, mover com 235 dias e 1,08 kg da fase III para fase IV dessa com 330 dias e 2,15 kg.

Figura 6. Curva de crescimento em peso tambaqui (*Colossoma macropomum*), em piscicultura semi-intensiva, escala comercial, no período abril/2012 a novembro/2013. Dados da pesquisa registrados de três ciclos e 100 amostras por unidade experimental total 6 tanques, no interior do Amazonas.



Fonte: autoria própria

Com base nos resultados do balanceamento do sistema de filas lotes de peixes nos tanques em função do tempo, é possível definir diferentes critérios de classificação para tomada decisão, na gestão do planejamento para despesca com peso alvo para o mercado, ou previsão para um plano de negócios de um novo projeto. No entanto, é necessário definir qual cenário com mix de peso alvo para o mercado garante a eficiência e rentabilidade na produção de biomassa do tambaqui. Para solução a essa questão, o resultado da otimização foi obtida com análise de simulação, de acordo com as seguintes premissas:

- i) O ciclo completo na piscicultura do tambaqui compreende desde a alevinagem até a despesca. Considerando múltiplos ciclos de produção por tanque.
- ii) O horizonte de tempo é dividido em períodos que compreendem as fases de crescimento nos tanques, em que as variáveis externas (temperaturas, OD, preços, custos) e variáveis de decisão (estratégias de despesca e entrada lote de peixes) podem ser consideradas constantes, a partir da estabilização do processo de despesca. Os resultados apresentados referem-se a um horizonte temporal de um ano, distribuído em três períodos 5, 7 e 11 meses para as fases II, III, IV respectivamente, definido como tempo de produção.
- iii) Considera a despesca imediata da fração predeterminada da biomassa limite no tanque ao final de cada fase, permanecendo a quantidade de peixes com peso correspondente à menor biomassa até atingir seu limite em cada sucessiva fase.

- iv) Considera os lotes de peixes com distribuição de peso homogênea.
- v) Os preços considerados para simulação são independentes da demanda. Em nosso estudo foi R\$ 4,00/kg; R\$ 5,00/kg; R\$ 6,50/kg para peixes com 0,5 kg; 1 kg e 2 kg respectivamente.

Com algoritmo matemático formulado para análise de simulação dos cenários layouts com 10 e 5 tanques, tendo como premissa despesa em ambos, mix de peso alvo com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg denominado de Mix-2 e Mix-3 respectivamente. Com objetivo otimizar a produção de biomassa do tambaqui em tanque semiescavado, maximizando o lucro. Os resultados computacionais gerados no software CPLEX Studio124 (IBM), após as combinações possíveis são mostrados na tabela 4.

Tabela 4. Otimização da produção de biomassa do tambaqui em tanque semiescavado

Variável	5 tanques (Simulados)				10 tanques (Simulados)			
	F-I	F-II	F-III	F-IV	F-I	F-II	F-III	F-IV
Tempo (dias) ¹	50	100	210	330	50	100	210	330
Nº peixes / lote	19200	4800	2400	1200	38400	4800	2400	1200
Peso final / fase (kg)	0,080	0,5	1,0	2,0	0,080	0,5	1,0	2,0
Quant. despesa peso único	-	19200	-	-	-	38400	-	-
Quant. despesa Mix - 2	-	9600	9600	-	-	19200	19200	-
Quant. despesa Mix - 3	-	9600	4800	4800	-	19200	9600	9600
Lucro peso único (R\$)	-	(-3.200,75)	-	-	-	8.974,74	-	-
Lucro Mix – 2 (R\$) ²	-	-- 5.426,15 --	-	-	-	-----32.379,10-----	-	-
Lucro Mix – 3 (R\$) ²	-	-----	9.009,55-----	-	-	-----	51.846,90-----	-

Fonte: autoria própria

¹Tempo na alevinagem fase - I foi fixado em 50 dias e esta incluído na fase – II para simulação (=150 dias).

²Lucro líquido parcial foi considerando o tempo de produção: F-II, F-III, F-IV resultados simulados.

5.3.5 Avaliação econômica

Para avaliação econômica foi seguida a metodologia descrita por Silva et al. (2003), considerou apenas o custo operacional parcial (COP), definido como valor gasto com ração e alevinos, salário, energia e manutenção, incluindo a depreciação por tanque. Sendo estes custos descontados da receita bruta (RB) obtida com a venda dos peixes vivos (*in natura*) no local da produção, conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5. Custo operacional parcial (COP) da produção biomassa tambaqui em tanque semiescavado

<i>1. Custos Fixos</i>	<i>unidade</i>	<i>5 tanques</i>	<i>10 tanques</i>
Depreciação das instalações e infraestrutura / tanque (R\$)	Mês	264,14	215,40
Energia elétrica / manutenção e outros (R\$)	Mês	1.248,25	1.248,25
Mão-de-obra e Encargos trabalhistas (70% MOD) (R\$) ¹	Mês	2.679,20	4.018,80
<i>2. Custos variáveis</i>			
Alevinos (R\$)	mil	80,00	80,00
Ração 28% Proteína Bruta (R\$)	R\$/kg	1,44	1,44
Consumo peso único CAA ² =1:1	R\$	27.648,00	55.296,00
Consumo Mix – 2 CAA = 1,2:1	R\$	30.412,80	60.825,60
Consumo Mix – 3 CAA = 1,6:1	R\$	33.177,60	66.355,20

Fonte: autoria própria

¹MOD = Mão-de-obra com salário (R\$ 788,00) com encargos (70%) sendo 1 encarregado para 5 tanques; e 1 funcionários e 1 encarregado para 10 tanques. ²CAA = Conversão Alimentar Aparente.

5.4 DISCUSSÃO

A demanda incessante por produção e o aumento da concorrência no mercado do tambaqui tem levado piscicultores a prática de despesca em período com ciclo curto, obtendo peixe com peso médio 0,5 kg para atender frigoríficos, resultando em uma redução das margens operacionais que afetam sua rentabilidade. Conforme Cacho (1997), o planejamento de despesca exerce maior impacto no fluxo de caixa do empreendimento de piscicultura, bem como alocação de recursos limitados de produção como ração, alevinos, trabalho, capital de giro e recursos ambientais. Para Llorente & Luna, (2014), a falta de competitividade de muitos empreendimentos aquícola, não é sobre aspectos técnico e biológico, mas surge da dificuldade da gestão do processo de produção e de tomada de decisão econômica. Os resultados apresentados neste trabalho sugerem um algoritmo matemático formulado e simulado com cenários de layout de 10 e 5 tanques (apêndices I e II), com a premissa de despesca em ambos, com mix de peso alvo com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg em função do tempo. Estabelecendo como principal objetivo otimizar a produção de biomassa do tambaqui em tanque semiescavado, maximizando o lucro.

O algoritmo matemático formulado com análise de simulação permitiu identificar estratégia de produção, orientando o piscicultor a tomar decisão com despescas de peso para espécie tambaqui, que seja mais adequada ao tamanho do empreendimento de piscicultura. Para Pauly et al. (1993) modelo matemático é capaz de descrever o sistema de viveiro com grau de precisão, em que se pode fazer previsões de crescimento e produção de peixe. A gestão de decisão e estratégias de cultura pode ser planejada de acordo com restrições econômicas e demanda de mercado (por exemplo, o tamanho do peixe ou tempo de despesca). Onde deve ser observado o efeito do limite densidade de estocagem pela disponibilidade de OD para o peixe no tanque em cada fase de crescimento. Mantendo o controle sobre as sucessivas fases de crescimento do tambaqui durante os

ciclos, evitando redução de OD a um nível crítico 3 mg/l no tanque (GOMES et al., 2006; VAL & ALMEIDA-VAL, 1995). Para produzir um lote de peixe de forma mais eficiente, é importante o controle de tempo que devem dura cada fase de crescimento. Seguindo a metodologia utilizada por Halachmi, (2007) em sistema de recirculação de aquicultura (RAS), foram efetuados os cálculos de tempo, sugerindo o número de dias que um lote de peixe permanece em uma determinada fase. Em nosso estudo, estes foram ajustados ao peso correspondente aos estimados pela curva de crescimento em peso do tambaqui em tanque semiescavado (figura 6). O peso final em cada fase é similar ao obtido por Izel & Melo (2004); Gomes & Silva (2009); Cavero et al. (2009).

No Amazonas pequenos piscicultores têm se desenvolvido com diferentes cenários de layout, em sistema semi-intensivo associado a diferentes custos. A falta de planejamento adequado para despesca, uma variável de decisão importante, e que afeta a rentabilidade do empreendimento, e por não ter um retorno econômico positivo, leva a descontinuidade do negócio. Para Forsberg (1999) em seu estudo com salmão em sistema de rede marinho, afirmou que o principal problema de planejamento de despesca é determinar o melhor sequenciamento do tempo de despesca de vários grupos de peixes que maximize a lucratividade. Simultaneamente, o piscicultor deve alocar recurso disponível, que satisfaça junto requisitos de mercado e restrição de produção. Em nosso estudo, o planejamento de despesca para atender o mercado de frigoríficos, supermercados e feiras livres, que obteve com a simulação e otimização da produção de biomassa do tambaqui a maior rentabilidade de R\$ 32.379,10 e R\$ 51.846,90 foi para cenários com layout 10 tanques, com despesca mix de peso alvo com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg respectivamente. Note que estes resultados foram com tempo de alevinagem fase – I igual ao praticado na fazenda, ou seja, 50 dias. Os resultados obtidos para cenários com layout 5 tanques, mostraram inicialmente que não é vantajoso a prática de despesca com peso único 0,5 kg. Onde foi verificado um valor negativo para lucratividade (R\$ -3.200,75), com a quantidade de 4800 peixes por tanque ou seja máxima densidade de biomassa limitada em 2400 kg. O estudo demonstrou que a quantidade máxima de produção de lote de peixes, pode ser estabelecida com a despesca em diferentes pesos alvo de mercado. Em que os lotes que produzem peixes maiores chegam obter lucros operacionais proporcionais, devido ao seu valor mais elevado de mercado (FORSBERG, 1999; HERNÁNDEZ et al., 2007; LLORENTE & LUNA, (2014).

A formulação de um problema de otimização com restrição não linear inteira, utilizando método de pesquisa operacional, pode não ser fácil de resolver, uma vez que a função objetivo deverá satisfazer inclusive variável linear inteira. Em nosso estudo, uma expressão foi definida para indicar na simulação computacional, a contabilização dos custos referente ao período de 5, 7 ou 11 meses do ciclo de produção, e incorporada na função objetivo. A expressão

$-C_f(5 + 2t_2 + 6t_3 - 2t_2t_3)$, sendo $t_1, t_2, t_3 \in \{0, 1\}$ definindo uma variável binária. Esta expressão garante exatamente a quantidade de meses que serão contados para se descontar o custo fixo mensal C_f , ou seja, 5, 7 ou 11 meses. Portanto, alterando alguns parâmetros de decisão (S – número de dias em cada fase, c - número de tanque, p – número de sub-lotes, N – número de alevinos) é possível obter valores definidos de acordo com as necessidades do empreendedor de piscicultura. Estudos recentes relacionando esses parâmetros foram feitos em RAS (HALACHMI, 2012). No entanto, outros estudos poderão trazer melhores soluções uma vez que foram identificados *gaps* (lacunas de tempo) entre as sucessivas fases de crescimento do peixe no tanque, e pode ser uma alternativa de investigação que melhore o desempenho do processo de produção de biomassa tambaqui. Outro ponto de investigação foi identificado no cálculo de equilíbrio do tempo entre as fases, em que sugere os dias que o peixe permanece numa determinada fase de crescimento, onde estudos futuros podem estabelecer melhor equilíbrio do sistema, de acordo com a biologia da espécie, variando o período em dias somente na fase de alevinagem propondo um fluxo de equilíbrio entre as fases, onde a taxa de entrada seja próximo à taxa de saída, ou seja, $1/\mu = 1/\lambda$.

5.5 CONCLUSÕES

O resultado obtido na simulação prediz uma situação de perfeito equilíbrio, isento de doenças, e falha técnica, que possa resultar em perda do lote de produção. Algumas limitações devem ser observadas, o algoritmo matemático para otimização do mix de peso alvo de mercado para o tambaqui, foi definida com o tempo em dias na fase de alevinagem fixada em 50 dias, Sendo esse tempo incorporado ao tempo de produção fase II para simulação. O resultado que apresentou maior rentabilidade de R\$ 32.379,10 e R\$ 51.846,90 foi em cenários com layout 10 tanques conforme apresentado neste estudo. O modelo proposto poderá ser adequado na introdução de outras espécies cultivadas. E para utilização desta metodologia, o modelador terá de obter informação necessária referente à espécie e com função de crescimento definida, com a distribuição estatística do peso alvo para o mercado. Assim, visando uma melhor eficiência e considerando o tempo não fixado para alevinagem, para uma adequação mais precisa, com parâmetros incluindo outras espécies, modelos mais gerais já estão sendo construídos.

AGRADECIMENTOS

À FAPEAM pela concessão da bolsa de estudo conforme decisão N° 188/2013 – bolsa de doutorado, referente ao Edital N. 005/2013 - RH-INTERIORIZAÇÃO - Fluxo Contínuo.

DIVULGAÇÃO

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. O(s) autor(es) e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista **European Journal of Operational Research** detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

REFERÊNCIAS

- ARBELAEZ-ROJAS, G. A.; FRACALOSSO, D.M.; FIM, J.D.I. (2002). Body composition of tambaqui, *Colossoma macropomum*, and matrinxã, *Brycon cephalus*, when raised in intensive (igarapé channel) and semi-intensive (pond) culture systems. *Brazilian Journal of Animal Science*, 31(3), 1059-1069.
- ARAÚJO-LIMA, C. A. R. M.; GOULDING, M. (1998). Os frutos do tambaqui: ecologia, conservação e cultivo na Amazônia. Tefé: Sociedade Civil Mamirauá; Brasília: CNPq, P.186.
- BALCI, O. (1998). Verification, validation, and testing. In *The handbook of simulation*, ed. J. Banks, Chapter 10. New York: John Wiley.
- BANKS, J. (1998). *Handbook of Simulation*. John Wiley & Sons, Inc. p.169-172. ISBN 0-471-13403-1
- BANKS, J., CARSON, J. S., NELSON, B. L., NICOL, D. M. (2005). *Discrete-event system simulation*. 4th ed. Upper Saddle River, N. J: Prentice-Hall.
- BONET, B. & GEFNER, H. (2005). A probabilistic planner based on heuristic search. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 24(1):933–944.
- BLUM, C., ROLI, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Over-view and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3):268–308.
- BJØRNDAL, T. (1988). Optimal harvesting of farmed fish. *Mar. Resour. Econ.* 5, 139–159.
- BJØRNDAL, T., Lane, D.E., Weintraub, A. (2004). Operational research models and the management of fisheries and aquaculture: a review. *European Journal of Operational Research* 156, 533–540.
- BRAUM, E.; JUNK, W.J. (1982). Morphological adaptation of two Amazonian characoids (*Pisces*) for surviving in oxygen efficient waters. *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, 67:869-886.
- CACHO, O.J. (1997). Systems modelling and bioeconomic modelling in aquaculture. *Aquaculture Economics & Management* 1, 45–64.
- CARVALHO, M.L. Alimentação do tambaqui jovem *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1818) e sua relação com a comunidade zooplânctônica do lago Grande de Manaquiri, Solimões – AM. Tese de mestrado. INPA/FUA. 90P. (1981).
- CAVERO, B.A.S.; RUBIM, M.A.L.; MARINHO-PEREIRA, T. (2009). Criação comercial do tambaqui, *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1818). In: TAVARES-DIAS, M. Manejo e sanidade de peixes em cultivo [recurso eletrônico]. Embrapa Amapá, p.33-46.
- FAO. (2012). *The State of World Fisheries and Aquaculture*. FAO, Rome.
- FAO (Food and Agriculture Organisation), IFAD (International Fund for Agricultural Development), & WFP (World Food Program) (2014). *The state of food insecurity in the world 2014. Strengthening the enabling environment for food security and nutrition* (Rome).

- FORSBERG, O.I. (1996). Optimal stocking and harvesting of size-structured farmed fish: a multi-period linear programming approach, *Math. Comp. Simulat.* 42 p.299–305.
- FORSBERG, O.I. (1999). Optimal harvesting of farmed Atlantic salmon at two cohort management strategies and different harvest operation restrictions, *Aquacult. Econ. Manage.* 3 p.143–158.
- GRAEF, E.W. (1995). As espécies de peixes com potencial para criação no Amazonas. In: *Criando peixes na Amazônia* (Val, A.I. e Honczarik, A. Eds) INPA, Manaus.
- GROSS, D. (2008). *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th ed. Wiley, Hoboken, N.J.
- GROSS, D., SHORTLE, J. F., THOMPSON, J. M., HARRIS, C. M. (2009). *Fundamentals of Queueing Theory*, 4 ed., Wiley-Interscience, New York, NY, USA.
- GOULDING M., CARVALHO M.L. (1982). Life history and management of the tambaqui (*Colossoma macropomum*, Characidae): an important Amazonian food fish. *Revista Brasileira de Zoologia* 12, 107–133.
- GOMES, L. C.; SILVA, C. R. (2009). Impact of pond management on tambaqui, *Colossoma macropomum* (Cuvier), production during growth-out phase. *Aquaculture Research*, Oxford, v. 40, p. 825-832.
- HALACHMI, I., (2007). Biomass management in re-circulating aquaculture systems using queuing networks. *Aquaculture* 262, 514–520.
- HALACHMI, I. (2012). Mathematical principles of a balanced layout design: Part I. 250-ton/year RAS Aquacultural Engineering, 50, pp. 1–10.
- HERNÁNDEZ, J.M., LEÓN-SANTANA, M., LEÓN, C.J. (2007). The role of the water temperature in the optimal management of marine aquaculture *European Journal of Operational Research*, 181 pp. 872–886.
- HOWARD, R. A. (1960). *Dynamic Programming and Markov Process*. The MIT Press.
- IZEL, A. C. U., MELO, L. A. S. (2004). Criação de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanques escavados no Estado do Amazonas. Manaus-AM. Embrapa Amazônia Ocidental, (Doc. 32)
- JOLLY, C.M, CLONTS, H.A. (1992). *Economics of Aquaculture*. New York:Food Products Press.
- KUBITZA, F. (2006). Questões frequentes dos produtores sobre a qualidade dos alevinos de tilápia. In: *Panorama da Aquicultura*, setembro/outubro, p.14 – 23.
- KLEIJNEN, J. P. C., SANCHEZ S. M., LUCAS T. W., CIOPPA, T. M. (2005). A user's guide to the brave new world of designing simulation experiment. *INFORMS Journal on Computing* 17(3):263-89.
- KUBITZA, F. and KUBITZA, LMM., (2000). Qualidade da água, sistemas de cultivo, planejamento da produção, manejo nutricional e alimentar e sanidade. *Panorama da Aquicultura*, vol. 10, no. 59, p. 44-53.
- LAW, A.M., KELTON, W.D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. Boston: McGraw-Hill.
- LEUNG, P. S. (1986). Applications of systems modelling in aquaculture. *Aquacult. Eng.*, 5, 183-97.
- LEUNG, P. S., SHANG, J. C. (1989). Modelling prawn production management systems: A dynamic markov decision approach. *Agril. Systems*, 29.5-20.
- LLORENTE, I., LUNA, L. (2014). Economic optimisation in seabream (*Sparus aurata*) aquaculture production using a particle swarm optimisation algorithm. *Aquaculture international* v.22 no.6 pp. 1837-1849.
- MARTINS, C.I.M., OCHOLA, D., ENDE, S.S.W., EDING, E.H., VERRETH, J.A.J. (2009b). Is growth retardation present in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* cultured in low water exchange recirculating aquaculture systems? *Aquaculture* 298, 43-50.

- MELO, L. A. S.; IZEL, A. C. U.; RODRIGUES, F. M. (2001). Criação de Tambaqui (*Colossoma macropomum*) em viveiros de argila/barragens no Estado do Amazonas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 30 p. : il. ; 21 cm. – (Embrapa Amazônia Ocidental ; ISSN 1517-3135 ; 18).
- NAYLOR, R.L., GOLDBURG, R.J., PRIMAVERA, J.H., KAUTSKY, N., BEVERIDGE, M.C.M., CLAY, J., FOLKE, C., LUBCHENCO, J., MOONEY, H., TROELL, M., (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405, 1017-1024.
- NAYLOR, R.L., HARDY, R.W., BUREAU, D.P., CHIU, A., ELLIOTT, M., FARRELL, A.P., FORSTER, I., GATLIN, D.M., GOLDBURG, R., HUA, K., NICHOLS, P.D. (2009). Feeding aquaculture in na era of finite resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 8, 15103–15110.
- OSMAN, I. H., LAPORTE, G. (1996). Metaheuristics: A bibliography. *Ann. Oper. Res.* 63, 513--623.
- PIDD, M. (1992). *Computer Simulation in Management Science*, Wiley.
- PUTERMAN, M. L. (1994). *Markov Decision Processes*. John Wiley and Sons, New York.
- SAINT-PAUL, U. (1984). Physiological adaptation to hypoxia of a neotropical characoid fish *Colossoma macropomum*, Serrasalmidae. *Env. Biol. Fish.*, vol. 11, no. 1, p. 53-62.
- SAINT PAUL, U. (1985). The neotropical serrasalimid *Colossoma macropomum*, a promising species for fish culture in Amazonia. *Animal Research and Development*, 22: 7-31.
- SAINT PAUL, U. (1986). Potential for aquaculture of South American freshwater fishes: a review. *Aquaculture*, 54:205-240.
- SOUSA, R. G. C., FREITAS, C. E. C. (2010). Seasonal catch distribution of tambaqui (*Colossoma macropomum*), Characidae in a central Amazon floodplain lake: implications for sustainable fisheries management. *Journal. Applied Ichthyology*. 27, 118–121.
- SILVA, P. C., KRONKA, S. N., TAVARES, L. H. S., SOUSA JÚNIOR, R. P., SOUZA, V. L. (2003). Avaliação econômica da produção da tilápia nilótica em tanques com diferentes trocas de água e densidades populacionais no sistema Raceway. *Acta Scientiarum*, v. 25, n. 1, p. 9-13.
- SILVA, C.R.; GOMES, L.C.; BRANDÃO, F.R. (2007). Effect of feeding rate and frequency on tambaqui (*Colossoma macropomum*) growth, production and feeding costs during the first growth phase in cages. *Aquaculture*, v.264, p.135-139. DOI: 10.1016/j.
- SANTOS, E.P. (1978). *Dinâmica de população aplicada à pesca e piscicultura*. São Paulo: HUCITEC. 129 p.
- SANTOS, E.P.; SILVA, A.B.; LOVSHIN, L.L. (1976). Análise quantitativa em um ensaio de piscicultura intensiva com pirapitinga, *Colossoma bidens*. *Bol. Tec. DNOCS*, 34 (2).
- SARSIS M.; LIM J. & HAGOOD R.W. (2001). Growth, survivorship, and nutrient uptake of giant clams (*Tridacna*) in aquaculture effluent. *Journal Of Shellfish Research* 20 (1): 171-176.
- SCHMITTOU, H.R. (1993). *Produção de peixes em altas densidades em tanques-rede de pequeno volume*. Associação Americana de Soja. Ed. Silvio Romero C. Coelho. Mogiana Alimentos S/A. Campinas, SP. 78p.
- SUMMERFELT, S.T., HANKINS, J.A., SUMMERFELT, S.R., HEINEN, J.M. (1993). Modeling continuous culture with periodic stocking and selective harvesting to measure the effect on productivity and biomass capacity of fish culture systems. In: Wang, J.-K. (Ed.), *Techniques for Modern Aquaculture (Proc.)*, 21–23 June 1993, Spokane, WA. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, p.581–593.
- SUMMERFELT, S. T., DAVIDSON, J. W., WALDROP, T. B., TSUKUDA, S. M., BEBAK-WILLIAMS, J. (2004). A partial-reuse system for coldwater aquaculture. *Aquacult. Eng.* 31, 157-181.

SUMMERFELT, S.T., SHARRER, M.J., TSUKUDA, S.M., GEARHEART, M. (2009). Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation *Aquacult. Eng.* 40, 17-27.

SEVILLA, A. & GUNTHER, J. (2000). Growth and feeding level in pre-weaning tambaqui *Colossoma macropomum* larvae. *Journal of the World Aquaculture Society* 31, p.218-224.

SPARRE, P. (1976). A Markovian decision process applied to optimization of production planning in fish farming *Meddr. Danm. Fisk. -og Havunders N.S.*, 7 pp. 111-197

TACON, A.G.J.; DE SILVA, S.S. (1997). Feed preparation and feed management strategies within semi-intensive fish farming system in the tropics. *Aquaculture*, v.151, p.379-404.

TEICHERT-CODDINGTON, D.R. (1996). Effect of stocking ration on semi-intensive polyculture of *Colossoma macropomum* and *Oreochromis niloticus* in Honduras, Central America. *Aquaculture*, v.143, p.291-302.

VAL, A. L.; ALMEIDA-VAL, V.M.F. (1995). *Fishes of the Amazon and their environment: physiological and biochemical features.* Springer-Verlag, Heidelberg, p.224.

WINSTON, W. L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms.* 4 ed. California: BrooksCole Thomson Learning.

WURMANN, C.F. (2010). *Situación actual y perspectivas de desarrollo de La acuicultura mundial.* FAO-Organização para Alimentação e Agricultura das Nações Unidas. Relatório Interno.

Apêndice - I

x_1 = unidades de peixes de 0,5 kg.

x_2 = unidades de peixes de 1,0 kg.

x_3 = unidades de peixes de 2,0 kg.

p_r = 1,44 preço por kg da ração.

p_1 = 4 reais por kg para peixes de 0,5 kg = 2 reais para cada peixe de 0,5kg

p_2 = 5 reais por kg para peixes de 1,0 kg.

p_3 = 6,50 reais por kg para peixes de 2 kg = 13 reais para cada peixe de 2 kg.

n = 10 tanques.

total = 38400; lote de alevinos tambaqui com peso (1,5 – 2 g).

bio = 2400; capacidade biomassa (kg) por tanque.

C_m = 80; valor pago por mil alevinos de tambaqui.

C_a = Custo de alevinos = $\left(\frac{total}{1000}\right)C_m$;

C_f = custo fixo mensal = 4018,80 + 1248,25 + n*215,40;

Função objetivo:

$$f = \left(p_1 - \frac{p_r}{2}\right)x_1 + (p_2 - 1.2p_r)x_2 + (p_3 - 3.2p_r)x_3 - C_f(2t_2 + 6t_3 - 2t_2t_3) - (C_a + 5C_f);$$

Maximizar f

Sujeito a:

$$x_1 + x_2 + x_3 = total;$$

$$x_2 + x_3 \leq (n - 2)bio;$$

$$0 \leq x_1 \leq total \cdot t_1$$

$$0 \leq x_2 \leq (n - 2)bio \cdot t_2$$

$$0 \leq x_3 \leq \frac{(n - 2)bio}{2} \cdot t_3$$

$$x_i \in \mathbb{Z}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$t_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, 3$$

Nota:

As variáveis t_1, t_2, t_3 são utilizadas para calcular o custo. Existe o custo mensal C_f . Se forem despesados peixes de 0,5 kg a variável x_1 será diferente de zero e nesta fase já teremos 5 meses com o custo fixo mensal. Neste caso t_1 será igual a 1.

Se forem despesados peixes de 1 kg a variável x_2 será diferente de zero e nesta fase já teremos acumulados 7 meses com o custo fixo mensal. Neste caso t_2 será igual a 1.

Se forem despesados peixes de 2 kg a variável x_3 será diferente de zero e no final desta fase já teremos 11 meses com o custo fixo mensal. Neste caso t_3 será igual a 1.

Para indicar se teremos um custo fixo mensal de 5, 7 ou 11 meses, colocamos na função objetivo a expressão: $-C_f(5 + 2t_2 + 6t_3 - 2t_2t_3)$. Lembrando que $t_1, t_2, t_3 \in \{0, 1\}$, esta expressão garante exatamente a quantidade de meses que serão contadas para se descontar o custo fixo mensal C_f , ou seja, 5, 7 ou 11 meses.

A função f a ser maximizada é o lucro líquido resultado das vendas dos peixes descontados dos custos de produção.

Apêndice - II

W_1 = unidades de peixes de 0.5 kg

W_2 = unidades de peixes de 1.0kg

W_3 = unidades de peixes de 2.0kg

p_r = 1,44 preço por kg da ração.

p_1 = 4 reais por kg para peixes de 0,5 kg = 2 reais para cada peixe de 0,5kg

p_2 = 5 reais por kg para peixes de 1,0 kg.

p_3 = 6,50 reais por kg para peixes de 2 kg = 13 reais para cada peixe de 2 kg.

n = 5 tanques.

total = 19200; lote de alevinos tambaqui com peso (1,5 – 2 g).

bio = 2400; capacidade biomassa (kg) por tanque.

C_m = 80; valor pago por mil alevinos de tambaqui.

C_a = Custo de alevinos = $\left(\frac{total}{1000}\right)C_m$;

C_f = custo fixo mensal = 2679,20 + 1248,25 + $n \cdot 264,14$;

Função objetivo:

$$f = (p_1 - p_r / 2)w_1 + (p_2 - 1.2 * p_r)w_2 + (p_3 - 3.2 * p_r)w_3 - Cf(2.0t_2 + 6.0t_3 - 2.0t_2t_3) - (Ca + 5.0Cf);$$

Maximizar: f

Sujeito à:

$$w_1 + w_2 + w_3 = total$$

$$w_2 + w_3 \leq (n - 1)bio;$$

$$w_3 \leq (n - 1)bio / 2;$$

$$x_1 + 4800x_2 + 9600x_3 + 14400x_4 + 19200x_5 - w_1 = 0$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \leq 1$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 - t_1 = 0$$

$$y_1 + 2400y_2 + 4800y_3 + 7200y_4 + 9600y_5 - w_2 = 0$$

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 - w_2 \leq 1$$

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 - t_2 = 0$$

$$z_1 + 1200z_2 + 2400z_3 + 3600z_4 + 4800z_5 - w_3 = 0$$

$$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 \leq 1$$

$$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 - t_3 = 0$$

$$x_i, y_i, z_i \in \{0,1\}, i = 1, \dots, 5.$$

$$t_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, 3.$$

As variáveis x_1 até x_5 são binárias e representam que a variável w_1 pode assumir somente alguns valores, a saber, {0, 4800, 9600, 14400, 19200}

As variáveis y_1 até y_5 são binárias e representam que a variável w_2 pode assumir somente alguns valores, a saber, {0, 2400, 4800, 7200, 9600}

As variáveis z_1 até z_5 são binárias e representam que a variável w_3 pode assumir somente alguns valores, a saber, $\{0, 1200, 2400, 3600, 4800\}$

As variáveis t_1 ; t_2 ; t_3 são utilizadas para calcular o custo. Existe o custo mensal C_f . Se forem despescados peixes de 0.5 kg a variável w_1 será diferente de zero e daí já teremos 5 meses com o custo fixo mensal. Neste caso t_1 será igual a 1.

Se forem despescados peixes de 1 kg a variável w_2 será diferente de zero e daí já teremos acumulados 7 meses com o custo fixo mensal. Neste caso t_2 será igual a 1.

Se forem despescados peixes de 2 kg a variável w_3 será diferente de zero e daí já teremos 11 meses com o custo fixo mensal. Neste caso t_3 será igual a 1.

Para indicar se teremos um custo de 5, 7 ou 11 meses, colocamos na função objetivo a expressão $-C_f(5 + 2t_2 + 6t_3 - 2t_2t_3)$. Lembrando que $t_1, t_2, t_3 \in \{0, 1\}$, esta expressão garante exatamente a quantidade de meses que serão contadas para se descontar o custo fixo mensal C_f , ou seja, 5, 7 ou 11 meses.

6. CAPÍTULO 2 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ALEVINAGEM NA OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO TAMBAQUI EM PISCICULTURA SEMI-INTENSIVA NA REGIÃO NORTE DO AMAZONAS*

*artigo preparado para submissão na revista: Aquacultural Engineering

Craveiro, J. M. C.¹, Freitas, C. E. C.¹, Cavero, B. A. S.¹, Tribuzy, Karla.²

¹Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Ciências Agrárias, Dep. Ciências Pesqueiras – Av. General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I, (<http://www.ppgcipet.ufam.edu.br>) Cep: 69077-000 Manaus, AM (Brazil). E-mail: jgabael@yahoo.com.br, (Craveiro, J.M.C.).

²Universidade Federal do Amazonas, ICE - Cep: 69077-000 Manaus, AM (Brazil).

Aquacultural Engineering
(www.elsevier.com/locate/aqua-online)
ISSN: 0144-8609
Fator de impacto: 1,181
Qualis: B1 (Zootecnia / Recursos Pesqueiros)

Resumo

A proposta de nosso estudo teve como premissa, avaliar o mix de peso para o mercado obtido com a variação no tempo de alevinagem préfixado, para o cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanque semiescavado. Os parâmetros avaliados referente os recursos são, os tanques cada um dos quais tem a sua própria capacidade, sua própria variável de estado, onde compreende a biomassa de peixe, função crescimento e taxa de mortalidade. O modelo incorpora dois tipos de variáveis de entrada. Variável de evento discreto compreende o numero de peixes cada lote, o numero de tanques disponível, o tempo entre a chegada de alevinos no sistema e frequência de classificação por peso para o mercado. E variável de tempo contínuo refere-se ao peso do peixe, OD disponível para o peixe, e consumo de ração. Onde as variáveis de decisão são as quantidades de peixes de 0,5kg, 1 kg e 2 kg que relacionados ao tempo de alevinagem pré-fixados em “30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 dias” na fase I, resulte na otimização da produção, peso alvo para o mercado em função do tempo, em cenários layout de 5 e 10 tanques, com premissa de despesa em ambos com mix de peso com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg com objetivo maximiza o lucro líquido. Considerando que a transição entre as fases de crescimento um processo estocástico, que satisfaz a propriedade de Markov. E o fluxo lote de peixes descreve uma fila sequencial através das fases de crescimento em relação ao tempo, foi possível definir o equilíbrio entre a entrada e saída do sistema. O resultado gerado, obteve para o planejamento de despesa, valores variando entre R\$ 46.930,20 a R\$ 92.165,40 com mix de peso de 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg para o tempo de alevinagem de 80 e 90 dias. Algumas limitações devem ser observadas, uma vez que estes resultados não foram considerando o horizonte de tempo contínuo na fase I – alevinagem, sendo factível de novos estudos.

Palavras chaves: Otimização, modelo de produção, desempenho econômico, *Colossoma macropomum*

Abstract

The purpose of our study was premised, assessing the weight of mix to the market obtained with the variation in the nursery preset time for the cultivation of tambaqui (*Colossoma macropomum*) in semiescavado tank. The parameters evaluated regarding the resources are, the tanks each of which has its own abilities, their own state variable, which comprises the biomass of fish, growth function and mortality. The model incorporates two types of input variables. Discrete event variable contains the number of fish each batch, the number of tanks available, the time between the arrival of young fish in the system and frequency of weight classification for the market. And continuous time variable refers to the weight of the fish, OD available to the fish, and feed intake. Where the decision variables are the quantities of fish of 0.5 kg, 1 kg and 2 kg which related to fixed-rate nursery time "30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 days" in phase I, resulting in the target weight mix for marketing optimization function of time in layout scenarios for 5 and 10 tanks with fish removal premise both with target weight mix with 0.5 kg, 1 kg and 0.5 kg 1 kg, 2 kg in order to optimize the biomass production of tambaqui that maximizes profit. Whereas the transition between stages of growth, satisfies the Markov property. Its flow plot of simulated fish, describe a line through sequential stages of growth with respect to time, a possible balance between inlet and outlet. The result generated, with prices considered for sale in the simulation are independent of demand, as follows: R \$ 4.00 / kg; R \$ 5.00 / kg; R \$ 6.50 / kg for fish with 0.5 kg; 1 kg and 2 kg respectively. And feed conversion ratio of 1: 1; 1.2: 1 and 1.6 to price ration of R \$ 1.44 / kg. Obtained for planning fish removal in order to maximize net profit, with values ranging full gear R \$ 46,930.20 to R \$ 92,165.40 was weighing mix with 0.5 kg, 1 kg and 0.5 kg, 1 kg, 2 kg for nursery time of 70, 80 and 90dias. Some limitations must be observed, as these results were not considering the horizon of continuous time in phase I - nursery, being feasible for further studies.

Key-words: Optimization, production model, economic performance, *Colossoma macropomum*

6.1 INTRODUÇÃO

Diante às mudanças climáticas, o máximo potencial na produção de peixe da aquicultura deve ser estabelecido, como alternativa de fornecimento frente aos impactos futuros, nos padrões de produção das pescas em função da depleção dos estoques, por deslocar a produção reduzida com as espécies que se movem para novos habitat (ISAAC & RUFFINO, 1996; FREITAS et al., 2007; COSTA et al., 2013; CAMPOS et al., 2015; CHEUNG et al., 2009a,b) ou como resultado de alterações na produção primária líquida marinha (BRANDER, 2007; CHEUNG et al., 2009b). A necessidade de estratégias no planejamento que melhorem a produção aquícola para suprir essa fonte essencial de proteínas, aminoácidos essenciais e minerais, especialmente nos países com déficit de alimentos e de baixa renda (EASTERLING, 2007; RICE & GARCIA, 2011; FAO, 2012) identificando potenciais alternativas e tomada de melhor decisão, que otimize a produção de biomassa são importantes, mas que leve em consideração a redução do seu impacto ambiental (NAYLOR et al., 2009).

Há consideráveis literaturas relacionadas com o gerenciamento de biomassa na aquicultura, com resultados simulados utilizando diferentes ferramentas de gestão, que permitem comparar diferentes cenários de layouts sob um amplo conjunto de condições (BJORNDAL, 1988; FORSBERG, 1999; ERNST et al., 2000; BJORNDAL et al., 2004). Em geral a solução dos problemas de otimização são frequentemente resolvidos por meio de ferramentas de pesquisa operacional (PO). Onde restrições importantes devem ser consideradas no planejamento e gerenciamento desta atividade (SUMMERFELT et al., 1993; CACHO, 1997). Visando utilização eficiente dos recursos, reduzir os custos, bem como avaliar a duração do ciclo de produção, balanceando o fluxo no sistema de fila, formada na transição das fases nos tanques com o tempo de crescimento do peixe considerado como um processo de Markov variável no tempo (FORSBERG, 1999; WINSTON, 2004; SUMMERFELT et al., 2009; HALACHMI, 2012). E sua otimização envolvem variáveis relacionadas com: biologia da espécie que irá determina o horizonte de tempo entre as fases de crescimento do peixe no tanque; variáveis externas (temperaturas, oxigênio dissolvido (OD), preços, custos); e principalmente variáveis de decisão (estratégias de despesa e entrada lotes de alevinos). A avaliação das restrições do sistema piscicultura, modos de operação e condições locais permitem alcançar melhores resultados do lucro sobre o investimento (BJORNDAL, 1988; FORSBERG, 1999; HALACHMI et al., 2005; HALACHMI, 2007; HERNANDEZ, 2007). Em nosso estudo, a premissa foi avaliar cenários com tempos discretos prefixados na alevinagem, que resultasse uma maior lucratividade na despesa com mix de peso alvo para o mercado, para o cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanque

semiescavado. Por ser um dos sistemas produtivos da aquicultura amplamente utilizado na piscicultura semi-intensiva na Região Norte no Amazonas, no qual piscicultores têm se desenvolvido inicialmente em pequena escala (GOMES & SILVA, 2009; CAVERO et al., 2009; IZEL & MELO, 2004). E necessitam de respostas inerentes as interações entre as variáveis de decisão e fatores biológico da espécie.

6.2 MATERIAL E MÉTODO

6.2.1 Sobre o peixe e obtenção dos dados

Para quantificar os parâmetros base para entrada do modelo, os dados zootécnicos foram coletados na fazenda Ecology Pescado, localizada no Km 11 do Ramal do Banco - Rodovia AM 010 Km 127, município de Rio Preto da Eva, próximo de Manaus - Amazonas, Brasil. Durante três semestres de cultivo que se estendeu de abril/2012 a novembro/2013, e englobou as fases de crescimento entre alevinagem e engorda. Inicialmente, os alevinos possuíam entre 1,5 e 2,0 g, dispostos em dois lotes de 19.200 peixes. E alimentados com ração comercial com 36% de proteína bruta à 5% da biomassa. Esta etapa foi denominada de fase I – alevinagem e teve duração de 50 dias. Após essa fase, distribuídos em partes iguais, sequencialmente em oito tanques de engorda e alimentados com ração comercial com 28% de proteína bruta à 3% da biomassa, com despesca total após 100 dias definido como fase II. Os tanques com área padronizada de 3.200 m² e 1,5 m de profundidade. Na fazenda, o volume de negócio atual visava atender a demanda para frigoríficos, que preferem peixes despescados com peso de 0,5 kg. Com base na situação real, foram simulados cenários de *layouts* de tanques desenhados, com a capacidade de biomassa limite definida pela disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD) para o peixe no tanque. O manejo alimentar e o controle dos parâmetros físico-químicos da água seguiram recomendações da literatura (ARAÚJO-LIMA & GOULDING, 1998; KUBITZA, 2000; IZEL & MELO, 2004; CAVERO et al., 2009; GOMES & SILVA, 2009). O cálculo do tempo sugerido que o peixe permanece em cada fase de crescimento no tanque, esta conforme metodologia descrita por Halachmi, (2007) em sistema com recirculação em aquicultura (RAS), e será demonstrado no resultado.

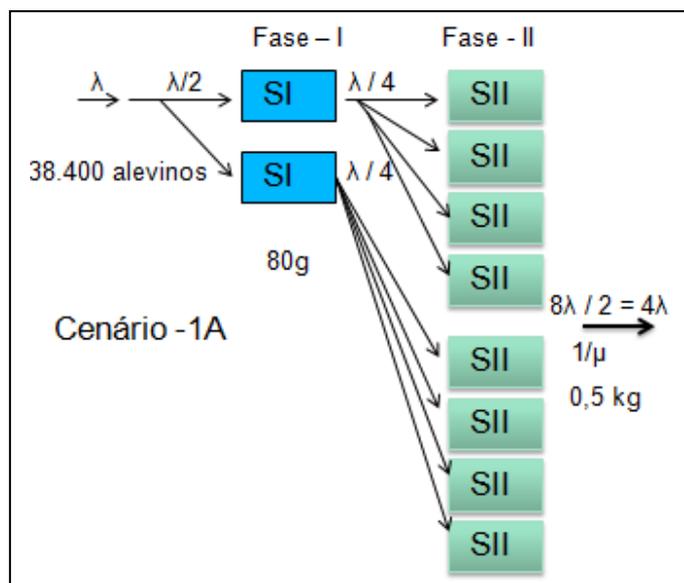
O tambaqui (*Colossoma macropomum*, Cuvier 1818) peixe da ordem Characiformes, pertencente à família Serrasalminidae (GERY, 1977; MIRANDE, 2010) e nativo dos rios Amazonas e Orinoco e seus afluentes. É a principal espécie nativa cultivada no Brasil e em alguns países da América Latina, por possuir boas qualidades zootécnicas (GRAEF, 1995; GOULDING & CARVALHO, 1982; SAINT-PAUL, 1986; SOUSA & FREITAS, 2010).

A avaliação econômica foi adaptada conforme a metodologia proposta por Silva et al. (2003), em que se considera apenas o custo operacional parcial (COP), definido como valor gasto com ração e alevinos, salário, energia e manutenção, incluindo a depreciação por tanque, com horizonte de tempo de exploração de quinze anos. E a receita bruta (RB) obtida com a venda dos peixes vivos (*in natura*) no local da produção, obtendo o lucro líquido parcial. Para análise de simulação do lucro líquido dos cenários layout 5 e 10 tanques, formulados em planilha eletrônica, os resultados foram demonstrados em gráfico de dispersão, no software Statistica 9.0 (StatSoft, 2009).

6.2.2 Conceituando sistema de fila lotes de peixes com tempo de alevinagem prefixados

Inicialmente para o planejamento das despesas, como função do mix ótimo de produção, foram considerados dois cenários, seguindo a metodologia descrita por Halachmi (2007) em sistema com recirculação em aquicultura (RAS) que determina o período nas sucessivas fases de crescimento. Em nosso estudo, o cenário 1A corresponde uma situação real (Figura 7) e permitiu a estimar a curva de crescimento em peso, utilizando estimação não-linear, com o algoritmo Quasi-Newton, no software Statistica 9.0 (StatSoft, 2009). A curva de crescimento, em peso, estimada para o tambaqui foi conforme a equação $y=(6950,79)*(1-\exp(-(1,18094)*x))^3$ para o período de cultivo.

Figura 7. Cenário 1A: correspondente situação real em um diagrama de transição '2, 8 layout' em tanque semiescavado de escala comercial no interior do Amazonas. Onde λ representa a chegada do lote de peixe passando pelo crescimento inicial na fase I – alevinagem e a taxa de partida para fase II - engorda. Si é a quantidade de tempo gasto esperado por um peixe em fase de crescimento i.



Fonte: autoria própria.

O cenário 1B consiste da simulação de um processo estocástico, utilizando valores de peso, estimados pela curva de crescimento em peso para o tambaqui. Que de acordo com a função de crescimento da espécie, é possível de estimar a probabilidade do peso de um indivíduo em uma série de transições entre a fase de alevinagem t_0 e fase de engorda t_1 para um determinado momento futuro, ou seja, peso ideal para despesca. Em nosso modelo, a premissa foi atender demandas do mercado em função do tempo, peso médio 0,5kg, 1kg e 2kg para frigoríficos, supermercados e feiras livres respectivamente. O consumo de ração foi proporcional à taxa de conversão alimentar, correspondente a cada peso em 1:1; 1,2:1 e 1,6:1 dado obtido junto administração da fazenda e será uma restrição usada no cálculo da avaliação econômica.

Para obter uma computação tratável, assumir que o processo estocástico satisfaz a propriedade de Markov, com transição do fluxo lote de peixes simulado, descrevendo uma fila sequencial através das fases de crescimento nos tanques semiescavados. Em que as características do processo dinâmico são governadas pela teoria da probabilidade, capaz de definir um conjunto de estados que podem alcançar e descrever os critérios de sua transição. No qual o tempo é uma medida linear através da qual o sistema se movimenta. Assim, quando um lote de peixe ou entidade, cresce ao seu tamanho pré-determinado, libera o tanque ou recurso, e segue para próxima fase. Ao final de cada fase de crescimento, um lote é dividido, para que os peixes iniciem com peso correspondente a menor biomassa até atingir seu limite em cada sucessiva fase. Para tanto, foram simulados cenários com tempos de alevinagem prefixados conforme tabela 6, buscando melhor equilíbrio do lote de chegada de peixe no sistema dado por λ e sua saída na despesca por μ , considerando que o tempo na fase alevinagem não influencia no lucro gerado na despesca, em relação tempo total do ciclo de produção.

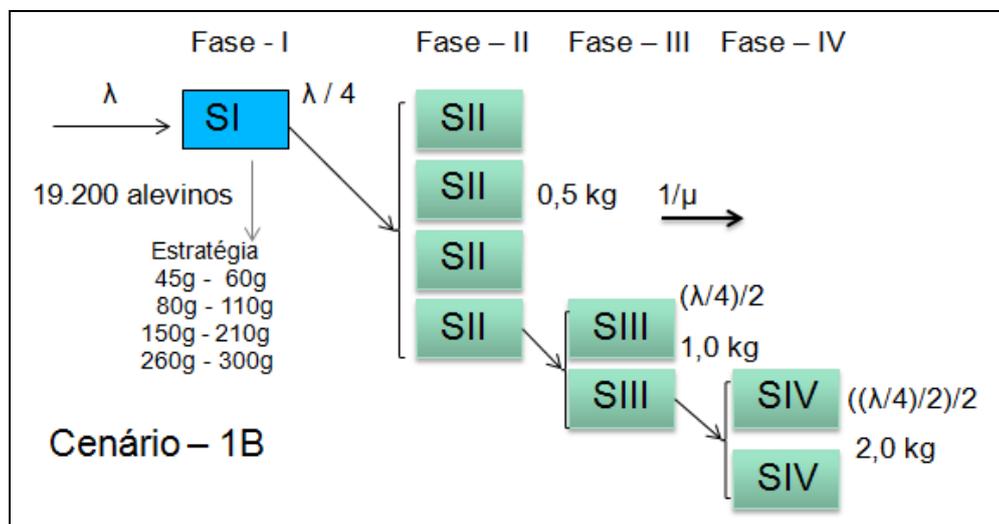
Tabela 6. Valores de tempo prefixado para alevinagem

Taxa entrada	Fase I	Peso	Fase II	Fase III	Fase IV	Taxa saída/fase		
	Alevinagem (dias)	médio após Alevin. (g)	Produção 0,5 kg (dias)	Produção 1kg (dias)	Produção 2 kg (dias)	1/ μ (ano)		
1/ λ (ano)						II	III	IV
12,16	30	45	120	60	120	3,04	6,08	3,04
9,12	40	60	110	60	120	3,31	6,08	3,04
7,30	50	80	100	60	120	3,65	6,08	3,04
6,08	60	110	90	60	120	4,05	6,08	3,04
5,21	70	150	80	60	120	4,56	6,08	3,04
4,56	80	210	70	60	120	5,21	6,08	3,04
4,05	90	260	60	60	120	6,08	6,08	3,04
3,65	100	300	50	60	120	7,30	6,08	3,04

Fonte: autoria própria.

Aliado a esta estratégia de produção, são consideradas modificações na área do tanque de alevinagem nas proporções de 1,5x, 2x, 2,5x. Onde os lotes de peixe iniciam o cultivo na fase de alevinagem e permanecem em um ponto discreto no tempo até o limite da capacidade de biomassa do sistema, que é definida pela disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD) para o peixe (ARANA, 2006; SAINT-PAUL, 1984; BRAUM & JUNK, 1982; VAL & ALMEIDA-VAL, 1995; PAULY & HOPKINS, 1983; PREIN, 1987). Em seguida, os lotes são transferidos para as fases seguintes do cultivo, caracterizando o ciclo de produção como um sistema de filas do tipo M/M/1 markoviano, ou seja, fila de canal único e fases múltiplas (LAW & KELTON, 2000; KLEIJNEN et al., 2005) factível ao cálculo de equilíbrio entre as sucessivas fases de crescimento do peixe (HALACHMI, 2007; 2012). Em que foram desenhados dois cenários de 5 e 10 tanques para análise de simulação, assim definidos, pequeno e grande piscicultor respectivamente. Conforme mostra o cenário layout com 5 tanques (Figura 8), sendo 1 para alevinagem e 4 para engorda, e que deve ser entendido, que para a transição nas fases III e IV será utilizado dois tanques somente nestas fases de engorda, uma vez que se pode obter um número de combinações possíveis de cenários para despesca.

Figura 8. Representa cenário 1B, um diagrama de transição '1, 4, 2, 2 layout' em tanque semiescavado. Onde representa a entrada lote de alevinos no sistema, passando pela fase I, e as taxas de partidas para fases de engorda II, III e IV. Si é a quantidade de tempo gasto esperado por um peixe na fase de crescimento i.



Fonte: autoria própria.

Note que nesse exemplo, apenas dois tanques são ocupados na fase III e IV em relação ao tempo de ciclo, permitindo entrada de um novo lote de peixe, conforme estratégia adotada para fase I. Sendo a quantidade excedente de peixes colocado à disposição do mercado.

6.2.3 Formulação do cálculo do número em dias em cada fase no sistema

Com a composição de vários tanques semiescavado na fazenda conforme *layout* mostrado na figura 7. Será usado como base para formular novos cenários para análise de simulação com *layout* 5 e 10 tanques, e aplicação dos cálculos em nosso modelo, com uma taxa de entrada e saída são iguais em cada tanque, assim o cenário 1B (figura 8) pode ser balanceado para obter λ ótimo para um sistema de fila com transições entre as fases de crescimento, sugerido conforme formula geral (Eq. (1)). Onde a expectativa do tempo que o peixe leva para crescer durante um ciclo de produção no tanque pode ser representado pela esperança $E(S)$ sendo S um ambiente controlado para o peixe crescer. Seguindo a metodologia descrita por Halachmi (2007), a chegada lotes de peixes no sistema dado por λ e saída na despesca por μ descrevendo uma distribuição de Poisson e Exponencial respectivamente. E sua principal abordagem para resolver problemas de planejamento probabilístico é através da sua modelagem como um processo Markoviano (HOWARD, 1960; BONET & GEFFNER, 2005; KLEIJNEN et al., 2005). Onde são feita as hipóteses que a seleção da melhor ação pode ser tomada conhecendo apenas o estado atual do agente e o ambiente é completamente observável (PUTERMAN, 1994; JACOBY et al., 2012). A utilização do tanque em 100% é obtida quando $\rho = \lambda / \mu = 1$ com isto, podemos estabelecer no modelo um equilíbrio entre a entrada lote de alevinos chegando ao sistema igual ou próximo a sua de saída $\lambda = \mu$ isto é, despesca para o mercado assumindo que:

$$E(S) = 1/\mu = 1/\lambda \quad (1)$$

Para o número de partes em que um lote de peixe é dividido (P), e o número de tanques escavado (c) em uma fase de crescimento onde:

$$\rho = (\lambda / \mu \cdot P / c) \quad (2)$$

Substituindo $\rho = 1$, significa alcançar 100% de utilização do tanque temos:

$$1 / \mu = (1 / \lambda \cdot c / P) \quad (3)$$

Substituindo $S = (1/\mu)$, onde S é tempo esperado que um peixe gasta na fase de crescimento i , obtém-se:

$$S_i = (1/\lambda \cdot c_i / \prod_1^i P_i) \quad (4)$$

$$S_i = 1/(\lambda P_i / c_i) = c_i / (\lambda P_i) \quad (5)$$

Onde S_i é o período na fase de crescimento i , c_i é o número esperado de tanque escavado na fase de crescimento i , P_i é o número de partes em que um lote de peixe é dividido, uma vez que entra em

fase de crescimento i , em geral essa divisão de categoria é conhecido como classificação e ordenação de eventos. Em nosso caso, o lote com $N_1 = 19200$ na fase I é dividido em partes menores, para fase II, formando P sub-lotes, ou seja, quatro lotes de $N_2 = 4800$ peixes cada, e o número real em categorias foi $P_2 = 2$ será mostrado nos resultados.

Em geral, o período de crescimento completo ΣSi é conhecido, e dependem das características biológicas da espécie cultivada e de condições locais no sistema de cultivo, como qualidade de água, temperatura, oxigênio, alimentação, e manejo, onde:

$$\Sigma Si = \Sigma(1/\lambda \cdot ci / \prod Pi) \rightarrow \Sigma Si = 1/\lambda \Sigma(ci/\prod Pi)$$

$$\rightarrow 1/\lambda = \Sigma Si / \Sigma(ci/\prod Pi) \quad (6)$$

$$\Sigma Si = \Sigma(ci / (\lambda Pi)) \rightarrow 1/\lambda = \Sigma Si / \Sigma(ci/Pi) \quad (7)$$

Para um volume de negócios anual projetado, T (tonelada por ano) obtido por:

$$T = \lambda \cdot N_f \cdot B_f = (\Sigma(ci/\prod Pi) / \Sigma Si) \cdot N_f \cdot B_f \quad (8)$$

Onde λ (lotes por ano) são as taxas de entrada e saída, resultantes do número de lotes de peixe que partem por ano, N_f (peixe) é o número de peixes em um lote no momento do mercado, e B_f (kg) é o peso final do peixe. Para o problema de otimização dado:

$$\max T = \max(\Sigma(ci/\prod Pi) / \Sigma Si) \cdot N_f \cdot B_f \quad (9)$$

Sujeito às restrições onde:

Σci = número de tanques escavado que podem caber em um determinado espaço da fazenda.

D_i = Densidade permitida de biomassa de peixes no final da fase de crescimento de qualquer i , definida no cálculo pela disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD) para o peixe no tanque. No presente estudo considerado 5 mg/l OD.

$$\Sigma Si \leq \text{período de crescimento total em todas as fases} \quad (10)$$

$B_i = B_{\text{alevino}} + Ct\Sigma Si$, onde biomassa inicial dos alevinos peso corporal do peixe é dependente da taxa de crescimento Ct e tempo no sistema ΣSi .

$$ci = \lambda \cdot Si \cdot \prod_1^i Pi, \text{ número de tanques de cultura em fase de crescimento } i \quad (\text{da Eq. (4)})$$

Os parâmetros de decisão foram nesse caso:

$$c_1, c_2, c_3, c_4, S_1, S_2, S_3, S_4, P_1, P_2, P_3, P_4, N, \lambda.$$

6.2.4 O modelo de otimização

Na piscicultura, muitas decisões estratégicas e operacionais podem ser otimizadas através de modelagem matemática que constitui a base da metodologia da pesquisa operacional (OSMAN & LAPORTE, 1996; BLUM & ROLI, 2003). Para Pidd (1992) modelagem e simulação de sistemas de produção, é um processo de criação e experimentação de modelo matemático e lógico de um

sistema físico. Onde o modelo é na verdade um conjunto de hipóteses sobre o funcionamento do sistema. Com suposições expressas por relações matemáticas, lógicas e simbólicas entre entidades ou objetos de interesse no sistema. E pode ser usado para avaliar um número de diferentes cenários hipotéticos relacionados com o sistema real, realizando a simulação, seja manualmente ou por computador. O resultado da simulação permite gerar combinações favoráveis, para melhor previsão das características operacionais do sistema real.

Em nosso estudo, os parâmetros avaliados referentes aos recursos são: os tanques cada um dos quais tem a sua própria capacidade, sua própria variável de estado, que envolvem a biomassa de peixe, a função de crescimento e a taxa de mortalidade. O modelo incorpora dois tipos de variáveis de entrada. A Variável de evento discreto que compreende o número de peixes em cada lote, o número de tanque disponível, o tempo entre a chegada de alevinos no sistema e a frequência de classificação por peso para o mercado. E variável de tempo contínuo que se refere ao peso do peixe, OD disponível para o peixe, e consumo de ração. Em que as variáveis de decisão são as quantidades de peixes de 0,5kg, 1 kg e 2 kg que relacionados ao tempo de alevinagem préfixados na fase I resultem na otimização do mix de peso alvo para mercado em função do tempo, em cenários layout para 5 e 10 tanques para análise de simulação, com premissa de despesca em ambos com mix de peso alvo com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg com objetivo na otimização da produção de biomassa do tambaqui em tanque semiescavado, que maximize o lucro.

Conforme a biologia do tambaqui o crescimento em peso, é alcançado no período previsto, assumindo para simulação, que um lote de peixe com peso alvo final 0,5 kg na fase II, são despescados após 150 dias de produção, e apresentam uma distribuição normal, com coeficiente de variação constante durante todo o período de crescimento. Seguindo o mesmo procedimento para um lote de peixe com peso alvo final de 1 kg na fase III e um lote com peso alvo final de 2 kg na fase IV, tem sua despesca após período anterior com 60 dias e 120 dias respectivamente. Os cenários layout com 10 tanques, são proporcional em quantidade aos cenários layout com 5 tanques. E foram formulados em planilha eletrônica para análise de simulação (figura 9), uma vez que se pode obter um número de combinações possíveis de mix peso alvo para despesca.

Figura 9. Representa cenários layout 5 tanques com mix peso alvo para mercado para o tambaqui em função dos diferentes tempos alevinagem prefixados (30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 e 100 dias) na fase I para análise e simulação da produção no sistema. Note que o sistema se estabiliza a partir da fase III e IV e servirá para planejamento da produção do sistema de piscicultura com possibilidade de diversos cenários de despesca.

<i>F-I</i>	<i>F-II</i>	<i>F-III</i>	<i>F-IV</i>	<i>F-III</i>	<i>F-IV</i>	<i>F-III</i>	<i>F-IV</i>
<i>Alevin.</i>	<i>Prod.</i>						
30	120	60	120	60	120	60	120
19200	4800	2400	4800	2400	4800	2400	4800
	4800	2400	4800	2400	4800	2400	4800
	4800	2400	4800	2400	4800	2400	4800
	4800	2400	1200	2400	1200	2400	1200
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
100	50	60	120	60	120	60	120
19200	4800	2400	4800	2400	4800	2400	4800
	4800	2400	4800	2400	4800	2400	4800
	4800	2400	4800	2400	4800	2400	4800
	4800	2400	1200	2400	1200	2400	1200

Fonte: autoria própria.

Com o balanceamento do sistema de filas lotes de peixes nos tanques em função do tempo, é possível definir diferentes critérios de classificação para tomada decisão, na gestão do planejamento para despesca com peso alvo para o mercado, ou previsão para um plano de negócio de um novo projeto (LLORENTE & LUNA, 2014; BJORN DAL et al., 2004). O resultado da otimização foi obtido com análise de simulação dos cenários, de acordo com as seguintes premissas:

- i) O ciclo completo na piscicultura do tambaqui compreende desde a alevinagem até a despesca, considerando múltiplos ciclos de produção por tanque.
- ii) O horizonte de tempo é dividido em períodos que compreendem as fases de crescimento nos tanques, em que as variáveis externas (temperatura, OD, preço, custo) e variáveis de decisão (estratégias de despesca e entrada lote de peixes) podem ser consideradas constantes, a partir da estabilização do processo de despesca. Os resultados apresentados referem-se a um horizonte temporal de um ano, com tempo de produção estabilizado a partir das fases III e IV.
- iii) Considera a despesca imediata da fração predeterminada da biomassa limite no tanque ao final de cada fase, permanecendo a quantidade de peixes com peso correspondente à menor biomassa até atingir seu limite em cada sucessiva fase.
- iv) Considera os lotes de peixes com distribuição de peso homogênea.

v) Os preços considerados para simulação são independentes da demanda. Em nosso estudo foi R\$ 4,00/kg; R\$ 5,00/kg; R\$ 6,50/kg para peixes com 0,5 kg; 1 kg e 2 kg respectivamente.

6.3 RESULTADOS

6.3.2 Cálculo do número sugerido em dias para cada fase de crescimento no tanque

Como premissa a estratégia de gestão para otimizar a produção de biomassa, foi estabelecida determinando a distribuição da variável de decisão no horizonte de tempo conforme visto figura 9, para maximizar o lucro. Dessa forma, o equilíbrio entre as sucessivas fases de crescimento do peixe, teve como base inicial o cálculo sugerindo o número de dias em que um determinado lote de peixes permanece em cada fase, substituindo no caso geral, para vários tanques em cada layout, nas Eqs. (4) e (7), e obteve os valores numéricos como foi feito para o *layout* '1, 4, 2, 2' (fig.2), com período de crescimento total do tambaqui $\Sigma Si = 330$ dias. Com o número de tanques de cultivo $c_1 = 1$; $c_2 = 4$; $c_3 = 2$ $c_4 = 2$; e o número de sub-lotes formados a partir de um lote $P_1 = 1$; $P_2 = 2$; $P_3 = 1$; $P_4 = 1$ obtemos:

$$\text{Eq. 7} \rightarrow 1/\lambda = 330 / (1/1 + 4/2 + 2/1 + 2/1) = 47 \text{ dias.}$$

$$\text{Eq. 4} \rightarrow SI = 1/\lambda \times c_i/P_i = 47 \times 1/1 = 47 \text{ dias.}$$

$$SII = 1/\lambda \times c_i/P_i = 47 \times 4/2 = 94 \text{ dias.}$$

$$SIII = 1/\lambda \times c_i/P_i = 47 \times 2/1 = 94 \text{ dias.}$$

$$SIV = 1/\lambda \times c_i/P_i = 47 \times 2/1 = 94 \text{ dias.}$$

Para Eq. (7) com três variáveis, onde c , o número de tanques escavados e P , o número de sub-lotes formados a partir de um lote, considerados parâmetros gerenciais na fazenda. E S , o período de crescimento, uma variável biológica que depende de uma variedade de condições, tais como qualidade da água, temperatura, oxigênio, alimentação, e manejo. Com o cálculo mostrado acima, λ ótimo e S_i garantem que todo o sistema será balanceado de forma considerável.

Neste caso, o tempo total foi $\Sigma Si = 330$ dias para o tambaqui alcançar o peso final de mercado, ou seja, o somatório dos tempos de espera em cada fase de crescimento do peixe. O cálculo do número ideal de dias em cada fase de crescimento é sugerido, mas que deve ser entendido pelo gestor, como um parâmetro de decisão para balancear o fluxo de produção no sistema de fila. Observe que o cenário 1A foi subdividido dando origem ao cenário 1B formulado inicialmente com 1 (um) tanque de alevinagem e 4 (quatro) tanques para engorda para facilitar entendimento dos cálculos.

6.3.1 O sistema de fila lote de peixes em função dos diferentes tempos alevinagem na fase I

Com tempo de espera de estado estável em cada fase de crescimento para o peixe, previamente calculado a partir da característica biológica da espécie. Para o tambaqui o tempo total de espera foi $\Sigma Si = 330$ dias. Este cálculo serviu como base para balancear o fluxo de produção e estabelecer planejamento estratégico, simulando sucessivas despescas, variando o tempo de alevinagem prefixados em 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 e 100 dias somente na fase I. Conforme premissa definida mix de peso alvo para o mercado com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg. Os cenários simulados em planilha eletrônica foram computados para layout 5 tanques, no qual foram comparados sua produção obtida com o mix de peso, com relação ao cenário 1A (real) praticado na fazenda. Os preços considerados para simulação são independentes da demanda. Em nosso estudo foi R\$ 4,00/kg; R\$ 5,00/kg; R\$ 6,50/kg para peixes com 0,5 kg; 1 kg e 2 kg respectivamente. O volume anual de produção de biomassa por tanque é limitada pela disponibilidade de OD para o peixe, em condições ótimas. O estado do ciclo de produção se estabilizou a partir da fase III e IV. Formando uma sequência que se repetem num determinado tempo futuro. Sendo estes valores considerados para otimiza a produção de biomassa do tambaqui em tanque semiescavado. E seus respectivos lucros líquidos com relação aos diferentes tempos de alevinagem são mostrados na tabela 7. A simulação dos cenários layout com 10 tanques, foram proporcional em quantidade com relação aos respectivos tempos prefixados para alevinagem dos cenários layout com 5 tanques, e os valores utilizados como parâmetros de COP são apresentados na tabela 8.

Tabela 7. Lucro líquido em relação aos diferentes tempos de alevinagem do tambaqui

Tempo alevin.	Nº tanque	Nº despesca	Peso alvo venda (kg)	Produção / ano (kg)	RB (R\$)	COP (R\$)	Lucro* (R\$)
30	5	3	0,5	28800	115.200,00	101.140,20	14.059,80
		2/2	0,5 / 1	9600 / 19200	134.400,00	91.309,80	43.090,20
		1/3/2	0,5 / 1 / 2	2400/10800/12000	141.600,00	100.679,40	40.920,60
40	5	3	0,5	28800	115.200,00	101.140,20	14.059,80
		2/2	0,5 / 1	9600 / 19200	134.400,00	91.309,80	43.090,20
		1/3/2	0,5 / 1 / 2	2400/10800/12000	141.600,00	100.679,40	40.920,60
50	5	3	0,5	28800	115.200,00	96.904,80	18.295,20
		2/2	0,5 / 1	9600 / 19200	134.400,00	91.309,80	47.325,60
		1/3/2	0,5 / 1 / 2	2400/10800/12000	141.600,00	100.679,40	40.920,60
60	5	4	0,5	38400	153.600,00	116.500,20	37.099,80
		2/2	0,5 / 1	9600 / 19200	134.400,00	87.074,40	47.325,60
		1/3/2	0,5 / 1 / 2	2400/10800/12000	141.600,00	100.679,40	40.920,60
70	5	4	0,5	38400	153.600,00	116.500,20	37.099,80
		3/2	0,5 / 1	14400 / 19200	153.600,00	106.669,80	46.930,20
		1/3/2	0,5 / 1 / 2	2400/10800/12000	141.600,00	100.679,40	40.920,60
80	5	5	0,5	48000	192.000,00	131.860,20	60.139,80
		3/2	0,5 / 1	14400 / 19200	153.600,00	106.669,80	46.930,20
		3/3/3	0,5 / 1 / 2	2400/10800/12000	180.000,00	104.519,40	75.480,60
90	5	6	0,5	57600	230.400,00	147.220,20	83.179,80
		3/3	0,5 / 1	14400 / 28800	201.600,00	109.434,60	92.165,40
		3/3/3	0,5 / 1 / 2	10800/18000/7200	180.000,00	104.519,40	75.480,60
100	5	7	0,5	67200	268.800,00	162.580,20	106.219,80
		3/3	0,5 / 1	14400 / 28800	201.600,00	105.199,20	96.400,80
		3/3/3	0,5 / 1 / 2	10800/18000/7200	180.000,00	100.284,00	79.716,00

Fonte: autoria própria.

* Lucro gerado considerando somente o tempo de produção, com a estabilização do sistema que será a partir da fase III e IV.

6.3.3 Avaliação econômica

Para avaliação econômica considerou o custo operacional parcial (COP), definido como valor gasto com ração e alevinos, salário, energia e manutenção, incluindo a depreciação por tanque (tabela 8), descontados da receita bruta (RB) referente á venda dos peixes vivos (*in natura*) no local da produção, para cenários layout com 5 e 10 taques.

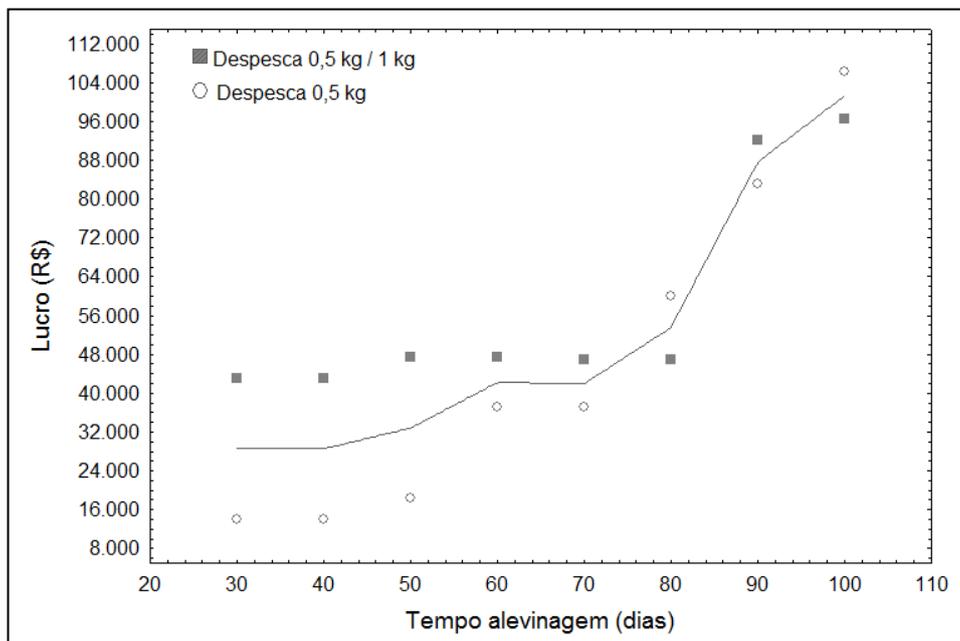
Tabela 8. Custo operacional parcial (COP) da produção biomassa tambaqui em tanque semiescavado

1. Custos Fixos	unidade	5 tanques	10 tanques
Depreciação das instalações e infraestrutura / tanque (R\$)	Mês	264,14	215,40
Energia elétrica / manutenção e outros (R\$)	Mês	1.248,25	1.248,25
Mão-de-obra e Encargos trabalhistas (70% MOD) (R\$) ¹	Mês	2.679,20	4.018,80
2. Custos variáveis			
Alevinos (R\$)	mil	80,00	80,00
Ração 28% Proteína Bruta (R\$)	R\$/kg	1,44	1,44
Consumo peso único CAA ² = 1:1	R\$	27.648,00	55.296,00
Consumo Mix – 2 CAA = 1,2:1	R\$	30.412,80	60.825,60
Consumo Mix – 3 CAA = 1,6:1	R\$	33.177,60	66.355,20

Fonte: autoria própria. ¹MOD = Mão-de-obra com salário (R\$ 788,00) com encargos (70%) sendo 1 encarregado para 5 taques; e 1 funcionários e 1 encarregado para 10 tanques. ²CAA = conversão alimentar aparente.

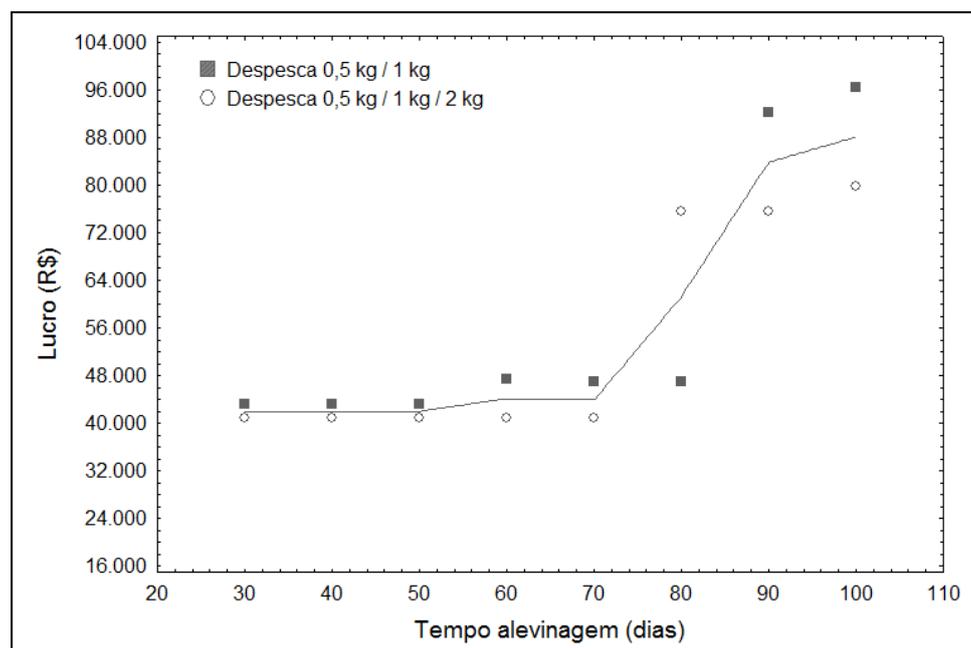
Se o problema para o piscicultor está em determinar a despesa no tempo que maximiza o lucro obtido com a venda do produto. A resposta da simulação pode auxiliar à melhor tomada de decisão. Com os resultados demonstrados, o planejamento da produção poderá optar por um volume de negócio anual, que maximiza o lucro quando o mix de peso alvo na despesa com taxa de saída dada por $1/\mu$ entra em equilíbrio com um determinado tempo de alevinagem prefixado, com taxa de entrada dada por $1/\lambda$. E comparando a situação 1A (real) com o resultado otimizado do mix obtido com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg foram observados pontos de maior rentabilidade, como visto nas figuras 10 e 11.

Figura 10. Representa otimização do Lucro obtido em relação a diferentes tempos de alevinagem, e compara duas estratégias de despesa de produção do tambaqui com peso alvo para o mercado: 0,5 kg, e 0,5 kg, 1 kg.



Fonte: autoria própria.

Figura 11. Representa otimização do Lucro obtido em relação a diferentes tempos de alevinagem, e compara duas estratégias de despesa de produção do tambaqui com peso alvo para o mercado: 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg.

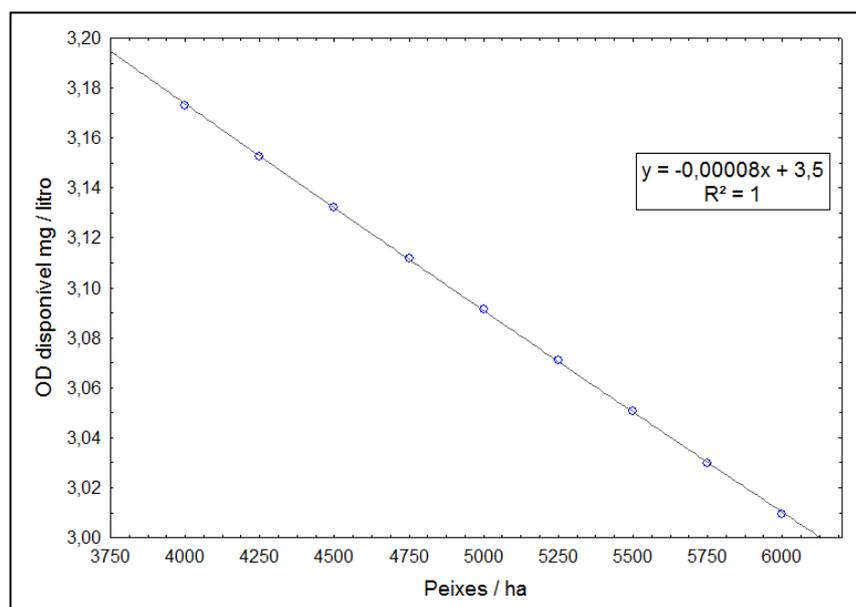


Fonte: autoria própria.

6.3.4 Critério do número de peixe nas sucessivas fases de crescimento

Para os tanques semiescavados no presente estudo, construídos cada um com volume 4800 m³ (40x80x1,5m). A taxa de respiração da espécie *Colossoma macropomum* é conhecida 250 mgO₂/kg/h. E foi usada como parâmetro no cálculo da biomassa máxima em função do tempo, é determinada pelo critério: densidade de estocagem pela disponibilidade de OD para o peixe no tanque em cada fase de crescimento. Observando a influência exercida com o aumento na quantidade de peixes no ambiente, causa redução de OD a um nível crítico 3 mg/l para espécie tambaqui (figura 12) (GOMES et al., 2006; VAL & ALMEIDA-VAL, 1995). A taxa de mortalidade foi de 1% em cada tanque, a temperatura média da água dos tanques semiescavados coletados ficou entre 28,03 °C a 29,92 °C. O manejo alimentar e o controle dos parâmetros físico-químicos da água seguiram recomendações da literatura (ARAÚJO-LIMA & GOULDING, 1998; KUBITZA, 2000; IZEL & MELO, 2004; CAVERO et al., 2009; GOMES & SILVA, 2009).

Figura 12. Note a influência na quantidade de peixes/ha sobre OD disponível mg/l dado pela equação $y = -0,00008x + 3,5$ resultado da pesquisa com tambaqui onde, $y =$ Oxigênio Dissolvido, $x =$ quantidade de peixe.



Fonte: autoria própria.

Na tabela 9 mostra os parâmetros usados no cálculo para planejamento da produção por tanque, sendo uma restrição importante. E deverá ser utilizada pela gestão da fazenda para balancear o fluxo de produção no sistema de tanques semiescavados, nas sucessivas fases de crescimento. Com a limitação da biomassa de 2400 kg por tanque, é demonstrado na última coluna $(7200000/250)/12=2400\text{kg}$. É possível alterações nas proporções em 1,5x, 2x, e 2,5x somente na área do tanque da fase de alevinagem, permitindo ser usado como estratégia, em transferir peixes com peso avançado em relação ao tempo de equilíbrio no sistema de cultivo, ou seja, $1/\mu = 1/\lambda$.

Tabela 9. Biomassa máxima de tambaqui pela disponibilidade de OD para o peixe no tanque

Volume (m³)	Litros	OD (mg/L)	Total OD	% OD consumo	OD p/ peixe	Consumo mgOD/kg Biomassa/h	Período (h)	Capac. Biomassa (kg)
4800	4800000	5	24000000	70,0	7200000	250	12	2400
7200	7200000	5	36000000	70,0	10800000	250	12	3600
9600	9600000	5	48000000	70,0	14400000	250	12	4800
12000	12000000	5	60000000	70,0	18000000	250	12	6000

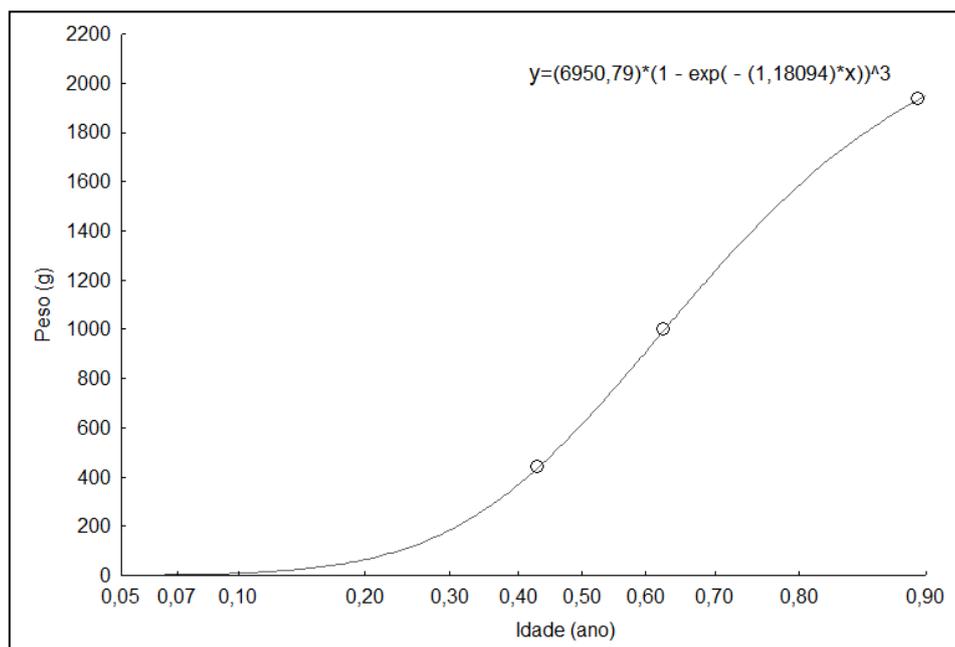
Fonte: autoria própria.

Com a composição de vários tanques semiescavado na fazenda conforme *layout* '1, 4, 2, 2' (figura 8), um lote de peixes com densidade $D = 19200$ como sugestão alterando em 2,5x a área tanque alevinagem, um peixe pode permanecer no tanque fase I até atingir capacidade de biomassa pela disponibilidade OD com o peso 312 g ($6000 \text{ kg}/19200 \text{ peixes} = 312 \text{ g/peixe}$). Em seguida transferido para as próximas fases. Atenção, a taxa de mortalidade 1% em cada fase não foi considerada no cálculo acima. Assim, em nosso estudo a taxa de mortalidade soma 4%, a compra de alevinos foi aumentada por um fator de 1,04 que corresponde a 768 unidades para compensar perda de peixe no ciclo de produção.

6.3.5 Estimação da curva de crescimento em peso do tambaqui em piscicultura semi-intensiva

O período de crescimento ótimo, ao final de cada fase, sugere mover um lote de peixe ou fazer sua despesca para o mercado conforme resultado obtido pela Eq. (4). Em nosso estudo o tempo calculado foi 47, 141, 235 e 330 dias, obtendo uma classificação do peixe em relação ao tempo (idade do peixe) com peso alvo estimado pela curva de crescimento em peso do tambaqui (figura 13) equação $y=(6950,79)*(1-\exp(-(1,18094)*x))^3$ projetando peixes com média de peso 0,080 kg, 0,487 kg, 1,08 kg, 2,15 kg. Obtendo o critério de transferir com tempo de 47 dias e 0,080 kg da fase I para fase II, mover com 141 dias e 0,487 kg da fase II para fase III, mover com 235 dias e 1,08 kg da fase III para fase IV dessa com 330 dias e 2,15 kg. Com base nesse exemplo, foram ajustados valores de tempo em cada fase conforme visto na figura 9.

Figura 13. Curva de crescimento em peso tambaqui (*Colossoma macropomum*), em piscicultura semiintensiva, escala comercial, no período abril/2012 a novembro/2013. Dados da pesquisa registrados de três ciclos e 100 amostras por unidade experimental total 6 tanques, no interior do Amazonas.



Fonte: autoria própria.

6.4 DISCUSSÃO

O sistema de produção da aquicultura representa um sistema dinâmico de eventos discretos, e que necessita de planejamento capaz de equilibrar restrições da produção e o custo do produto que podem variar ao longo do tempo, dependendo da tecnologia empregada, o crescimento dos peixes, a alimentação, práticas de gestão, e outros fatores, para satisfazer requisitos do mercado (FORSBERG, 1999). Em nosso estudo, onde as variáveis de decisão foram, a quantidade de peixes de 0,5kg, 1 kg e 2 kg que relacionados ao tempo de alevinagem préfixados na fase I. Resultou na otimização do mix de peso alvo para o mercado em função do tempo, simulados em cenários layout para 5 e 10 tanques, com a premissa de despesca em ambos com mix de peso alvo com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg com objetivo na otimização da produção de biomassa do tambaqui em tanque semiescavado, para maximizar o lucro. Para Cacho (1997), o planejamento de despesca exerce maior impacto no fluxo de caixa do empreendimento de piscicultura, bem como alocação de recursos limitados de produção como ração, alevinos, trabalho, capital de giro e recursos ambientais. Para Llorente & Luna (2014), a falta de competitividade de muitos empreendimentos aquícolas, não é sobre aspectos técnico e biológico, mas surge da dificuldade da gestão do processo de produção e de tomada de decisão econômica.

A demanda incessante por produção, e o aumento da concorrência no mercado do tambaqui, tem levado piscicultores a prática despescas em período com ciclo curto, obtendo peixe com peso

médio 0,5 kg para atender frigoríficos. Resultando em uma redução das margens operacionais e que afetam sua rentabilidade. É importante observar que de acordo com Schmittou (1993) a produção eficiente não significa o peso máximo que se pode produzir, mas, sim, o peso a ser produzido com o melhor índice de conversão alimentar no menor período de tempo possível, e com um peso final aceito pelo mercado consumidor. No entanto, a gestão de decisão e estratégias de cultura pode ser planejada de acordo com restrições econômicas e demanda de mercado (por exemplo, o tamanho do peixe ou tempo de despesca). Respeitando o limite densidade de estocagem pela disponibilidade de OD para o peixe no tanque em cada fase de crescimento. Mantendo o controle sobre as sucessivas fases de crescimento do tambaqui durante os ciclos, evitando redução de OD a um nível crítico 3 mg/l no tanque (GOMES et al., 2006; VAL & ALMEIDA-VAL, 1995).

O controle do tempo que deve dura cada fase de crescimento para produzir um lote de peixe de forma mais eficiente, é importante. Seguindo a metodologia utilizada por Halachmi (2007) em sistema de recirculação de aquicultura (RAS), foi possível estabelecer o cálculo do tempo sugerido do número de dias que um lote de peixe permanece em determinada fase. Porém, o número ideal de dias em cada fase de crescimento é sugerido, mas que deve ser entendido pelo gestor, como um parâmetro de decisão para balancear o fluxo de produção no sistema de fila. E leve em consideração a espécie cultivada e a estratégia de peso alvo para o mercado, como em nosso estudo para o tambaqui, o horizonte de tempo foi deduzido pela curva de crescimento (figura 13). O peso final em cada fase foi similar ao obtido por Izel & Melo (2004); Gomes & Silva (2009); Cavero et al. (2009).

A gama de problemas de otimização na aquicultura é muito ampla, resultantes de um número significativo de espécies, modos de operação e condições locais. No entanto, poucos estudos focaram em gaiolas marinhas para produção salmão do Atlântico (FORSBERG, 1999; HERNANDEZ et al., 2007), em sistema de recirculação de aquicultura aplicando teoria das filas (RAS; HALACHMI, 2007; HALACHMI, 2012), em modelos dinâmicos baseado em equação diferencial (HERNANDEZ et al., 2003) ou processo de Markov (SPARRE, 1977; FORSBERG, 1996) e controle ótimo de restrições do sistema como temperatura (HERNANDEZ et al., 2007) etc. Porém, os resultados apresentados neste trabalho, com simulação para cenários layout com 5 e 10 taques em escala comercial, com tempo prefixados na alevinagem para espécie tambaqui, podem auxiliar à melhor tomada de decisão no planejamento do peso alvo para despesca. Para Llorente & Luna, (2014) a quantidade máxima de produção de lote de peixes pode ser obtida com a despesca em diferentes pesos. Onde os lotes que produzem peixes maiores chegar obter lucros operacionais proporcionais, devido ao seu valor mais elevado de mercado. Com os resultados demonstrados figuras 10 e 11, em que pontos ótimos são observados no mix de peso alvo para o mercado visto na tabela 7. O lucro gerado com a variação dos tempos prefixados na fase I foi considerando somente o

tempo de produção, com a estabilização do sistema dada a partir da fase III e IV. Sendo que o tempo de espera nas fases anterior a estas, acontecem simultaneamente no período de estabilização do sistema. Sugerindo o planejamento de produção com foco no volume de negócio anual, que maximize o lucro, conforme o tamanho do empreendimento de piscicultura. Note que pontos que maximiza o lucro são obtidos com mix de peso com 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg para o tempo de alevinagem de 80 e 90, representando maior rentabilidade no sistema com relação ao obtido no cenário 1A (real).

Figura 14. Eficiência de lucratividade na produção do tambaqui em tanque semiescavado comparando o tempo de alevinagem em relação ao mix de peso para o mercado.

Eficiência		Menos			Mais		
Alevinagem		Despesa peso alvo para venda (kg)					
(dias)		0,5	0,5 e 1	0,5, 1 e 2			
30	-	-	X	-			
40	-	-	X	-			
50	-	-	X	-			
60	-	-	X	-			
70	-	-	X	-			
80	-	-	-	X			
90	-	-	-	X			
100	-	-	X	-			
Lucro líquido ¹		-	43.090,20 até 96.400,80	75.480,60 até 92.165,40			

Fonte: autoria própria.

A figura 14 mostra que a eficiência na produção de biomassa do tambaqui, que apresenta maior lucratividade, é quando o planejamento é direcionado à despesa com mix de produto, com diferentes pesos para o mercado. Este resultado é estratégico para a gestão do número de ciclos a partir da estabilização do sistema de despesa, bem como para o consumo de ração que influencia diretamente nos custos da produção, e podem melhorar políticas de incentivo e adequação as normas ambientais, uma vez que se pode obter maior produtividade por unidade (COSTELLO et al., 2008; GUTIERREZ et al., 2011). Para Naylor et al. (2009) assegurar que a aquicultura continuara a crescer de forma sustentável, serão as principais limitações para a sustentabilidade da produção mundial de peixe.

6.5 CONCLUSÕES

Este estudo analisou os resultados obtidos na despesca com mix de peso alvo, para a espécie tambaqui em tanque semiescavado em escala comercial, submetidos à variação do tempo prefixado na fase de alevinagem. Com objetivo na otimização da produção de biomassa, para maximizar o lucro. A simulação dos cenários layout com 5 e 10 tanque, prediz uma situação de perfeito equilíbrio, isento de doenças, falha técnica, que possa resultar em perda do lote de produção. O pressuposto considerado para análise e simulação foi que o tempo na fase alevinagem não influencia no lucro, em relação ao tempo total do ciclo de produção. Os resultados demonstraram que a melhor lucratividade, é obtida na despesca com mix de peso quando o tempo de saída entra em equilíbrio com o tempo de alevinagem com 80 e 90 dias. No entanto, outros estudos poderão trazer melhores soluções, uma vez que foram identificados *gaps* (lacunas de tempo) entre as sucessivas fases de crescimento do peixe no tanque, e é uma alternativa de investigação que melhore o desempenho da produção de biomassa do tambaqui. Com o propósito de incluir os *gaps* e considerando o horizonte de tempo contínuo, estudos e um modelo mais geral de otimização já estão sendo construídos.

AGRADECIMENTOS

À FAPEAM pela concessão da bolsa de estudo conforme decisão N° 188/2013 – bolsa de doutorado, referente ao Edital N. 005/2013 - RH-INTERIORIZAÇÃO - Fluxo Contínuo.

DIVULGAÇÃO

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. O(s) autor(es) e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Aquacultural Engineering* (www.elsevier.com/locate/aqua-online) detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

REFERÊNCIAS

- ARBELAEZ-ROJAS, G. A.; FRACALOSI, D.M.;FIM, J.D.I. (2002). Body composition of tambaqui, *Colossoma macropomum*, and matrinxã, *Brycon cephalus*, when raised inintensive (igarapé channel) and semi-intensive (pond) culture systems. *BrazilianJournal of Animal Science*, 31(3), 1059-1069.
- ARAÚJO-LIMA, C. A. R. M.; GOULDING, M. (1998). Os frutos do tambaqui: ecologia, conservação e cultivo na Amazônia. Tefé: Sociedade Civil Mamirauá; Brasília: CNPq, P.186.
- BALCI, O. (1998). Verification, validation, and testing. In *The handbook of simulation*, ed. J. Banks, Chapter 10. New York: John Wiley.
- BANKS, J. (1998). *Hundbook of Simulation* . John Wiley & Sons, Inc. p,169-172. ISBN 0-471-13403-1
- BANKS, J., CARSON, J. S., NELSON, B. L., NICOL, D. M. (2005). *Discrete-event system simulation*. 4th ed. Upper Saddle River, N. J: Prentice-Hall.
- BONET, B. & GEFFNER, H. (2005). A probabilistic planner based on heuristic search. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 24(1):933–944.
- BLUM, C., ROLI, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Over-view and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys* , 35(3):268–308.
- BJØRNDAL, T. (1988). Optimal harvesting of farmed fish. *Mar. Resour. Econ.* 5, 139–159.
- BJØRNDAL, T., Lane, D.E., Weintraub, A. (2004). Operational research models and the management of fisheries and aquaculture: a review. *European Journal of Operational Research* 156, 533–540.
- BRAUM, E.; JUNK, W.J. (1982). Morphological adaptation of two Amazonian characoids (Pisces) for surviving in oxygen efficient waters. *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, 67:869-886.
- CACHO, O.J. (1997). Systems modelling and bioeconomic modelling in aquaculture. *Aquaculture Economics & Management* 1, 45–64.
- CARVALHO, M.L. Alimentação do tambaqui jovem *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1818) e sua relação com a comunidade zooplancônica do lago Grande de Manaquiri, Solimões – AM. Tese de mestrado. INPA/FUA. 90P. (1981).
- CAVERO, B.A.S.; RUBIM, M.A.L.; MARINHO-PEREIRA, T. (2009). Criação comercial do tambaqui, *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1818). In: TAVARES-DIAS, M. Manejo e sanidade de peixes em cultivo [recurso eletrônico]. Embrapa Amapá, p.33-46.
- CAMPOS, C. P., COSTA SOUSA, R. G., CATARINO, M. F., de ALBUQUERQUE COSTA, G. and FREITAS, C. E. C. (2015), Population dynamics and stock assessment of *Colossoma macropomum* caught in the Manacapuru Lake system (Amazon Basin, Brazil). *Fisheries Management and Ecology*, 22: 400–406.
- COSTA, LRF, BARTHEM, RB, ALBERNAZ, AL, BITTENCOURT, MM, VILLACORTA-CORRÊA, MA. (2013). Modelling the growth of tambaqui, *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1816) in floodplain lakes: model selection and multimodel inference. *Brazilian Journal of Biology*, 73(2), 397-403.
- FORSBERG, O.I. (1996). Optimal stocking and harvesting of size-structured farmed fish: a multi-period linear programming approach, *Math. Comp. Simulat.* 42 p.299–305.
- FORSBERG, O.I. (1999). Optimal harvesting of farmed Atlantic salmon at two cohort management strategies and different harvest o

peration restrictions, *Aquacult. Econ. Manage.* 3 p.143–158.

GRAEF, E.W. As espécies de peixes com potencial para criação no Amazonas. In: *Criando peixes na Amazônia* (Val, A.I. e Honczarik, A. Eds) INPA, Manaus. (1995).

GROSS, D. (2008). *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th ed. Wiley, Hoboken, N.J.

GROSS, D., SHORTLE, J. F., THOMPSON, J. M., HARRIS, C. M. (2009). *Fundamentals of Queueing Theory*, 4 ed., Wiley-Interscience, New York, NY, USA.

GOULDING M., CARVALHO M.L. (1982). Life history and management of the tambaqui (*Colossoma macropomum*, Characidae): an important Amazonian food fish. *Revista Brasileira de Zoologia* 12, 107–133.

GOMES, L. C.; SILVA, C. R. (2009). Impact of pond management on tambaqui, *Colossoma macropomum* (Cuvier), production during growth-out phase. *Aquaculture Research*, Oxford, v. 40, p. 825-832.

HALACHMI, I., (2007). Biomass management in re-circulating aquaculture systems using queuing networks. *Aquaculture* 262, 514–520.

HALACHMI, I. (2012). Mathematical principles of a balanced layout design: Part I. 250-ton/year RAS Aquacultural Engineering, 50, pp. 1–10.

HERNÁNDEZ, J.M., LEÓN-SANTANA, M., LEÓN, C.J. (2007). The role of the water temperature in the optimal management of marine aquaculture *European Journal of Operational Research*, 181 pp. 872–886.

HOWARD, R. A. (1960). *Dynamic Programming and Markov Process*. The MIT Press.

IZEL, A. C. U., MELO, L. A. S. (2004). Criação de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanques escavados no Estado do Amazonas. Manaus-AM. Embrapa Amazônia Ocidental, (Doc. 32)

JOLLY, C.M, CLONTS, H.A. (1992). *Economics of Aquaculture*. New York:Food Products Press.

KUBITZA, F. (2006). Questões frequentes dos produtores sobre a qualidade dos alevinos de tilápia. In: *Panorama da Aquicultura*, setembro/outubro, p.14 – 23.

KLEIJNEN, J. P. C., SANCHEZ S. M., LUCAS T. W., CIOPPA, T. M. (2005). A user's guide to the brave new world of designing simulation experiment. *INFORMS Journal on Computing* 17(3):263-89.

KUBITZA, F. and KUBITZA, LMM., (2000). Qualidade da água, sistemas de cultivo, planejamento da produção, manejo nutricional e alimentar e sanidade. *Panorama da Aqüicultura*, vol. 10, no. 59, p. 44-53.

LAW, A.M., KELTON, W.D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. Boston: McGraw-Hill.

LEUNG, P. S. (1986). Applications of systems modelling in aquaculture. *Aquacult. Eng.*, 5, 183-97.

LEUNG, P. S., SHANG, J. C. (1989). Modelling prawn production management systems: A dynamic markov decision approach. *Agril. Svstems.*, 29.5-20.

LLORENTE, I., LUNA, L. (2014). Economic optimisation in seabream (*Sparus aurata*) aquaculture production using a particle swarm optimisation algorithm. *Aquaculture international* v.22 no.6 pp. 1837-1849.

- MARTINS, C.I.M., OCHOLA, D., ENDE, S.S.W., EDING, E.H., VERRETH, J.A.J. (2009b). Is growth retardation present in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* cultured in low water exchange recirculating aquaculture systems? *Aquaculture* 298, 43-50.
- MELO, L. A. S.; IZEL, A. C. U.; RODRIGUES, F. M. (2001). Criação de Tambaqui (*Colossoma macropomum*) em viveiros de argila/barragens no Estado do Amazonas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 30 p. : il. ; 21 cm. – (Embrapa Amazônia Ocidental ; ISSN 1517-3135 ; 18).
- NAYLOR, R.L., GOLDBURG, R.J., PRIMAVERA, J.H., KAUTSKY, N., BEVERIDGE, M.C.M., CLAY, J., FOLKE, C., LUBCHENCO, J., MOONEY, H., TROELL, M., (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405, 1017-1024.
- NAYLOR, R.L., HARDY, R.W., BUREAU, D.P., CHIU, A., ELLIOTT, M., FARRELL, A.P., FORSTER, I., GATLIN, D.M., GOLDBURG, R., HUA, K., NICHOLS, P.D. (2009). Feeding aquaculture in na era of finite resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 8, 15103–15110.
- OSMAN, I. H., LAPORTE, G. (1996). Metaheuristics: A bibliography. *Ann. Oper. Res.* 63, 513--623.
- PIDD, M. (1992). *Computer Simulation in Management Science*, Wiley.
- PUTERMAN, M. L. (1994). *Markov Decision Processes*. John Wiley and Sons, New York.
- SAINT-PAUL, U. (1984). Physiological adaptation to hypoxia of a neotropical characoid fish *Colossoma macropomum*, Serrasalmidae. *Env. Biol. Fish.*, vol. 11, no. 1, p. 53-62.
- SAINT PAUL, U. (1985). The neotropical serrasalimid *Colossoma macropomum*, a promising species for fish culture in Amazonia. *Animal Research and Development*, 22: 7-31.
- SAINT PAUL, U. (1986). Potential for aquaculture of South American freshwater fishes: a review. *Aquaculture*, 54:205-240.
- SOUSA, R. G. C., FREITAS, C. E. C. (2010). Seasonal catch distribution of tambaqui (*Colossoma macropomum*), Characidae in a central Amazon floodplain lake: implications for sustainable fisheries management. *Journal. Applied Ichthyology*. 27, 118–121.
- SILVA, P. C., KRONKA, S. N., TAVARES, L. H. S., SOUSA JÚNIOR, R. P., SOUZA, V. L. (2003). Avaliação econômica da produção da tilápia nilótica em tanques com diferentes trocas de água e densidades populacionais no sistema Raceway. *Acta Scientiarum*, v. 25, n. 1, p. 9-13.
- SILVA, C.R.; GOMES, L.C.; BRANDÃO, F.R. (2007). Effect of feeding rate and frequency on tambaqui (*Colossoma macropomum*) growth, production and feeding costs during the first growth phase in cages. *Aquaculture*, v.264, p.135-139. DOI: 10.1016/j.
- SANTOS, E.P. (1978). *Dinâmica de população aplicada à pesca e piscicultura*. São Paulo: HUCITEC. 129 p.
- SANTOS, E.P.; SILVA, A.B.; LOVSHIN, L.L. (1976). Análise quantitativa em um ensaio de piscicultura intensiva com pirapitinga, *Colossoma bidens*. *Bol. Tec. DNOCS*, 34 (2).
- SARSIS M.; LIM J. & HAGOOD R.W. (2001). Growth, survivorship, and nutrient uptake of giant clams (*Tridacna*) in aquaculture effluent. *Journal Of Shellfish Research* 20 (1): 171-176.
- SCHMITTOU, H.R. (1993). *Produção de peixes em altas densidades em tanques-rede de pequeno volume*. Associação Americana de Soja. Ed. Silvio Romero C. Coelho. Mogiana Alimentos S/A. Campinas, SP. 78p.
- SUMMERFELT, S.T., HANKINS, J.A., SUMMERFELT, S.R., HEINEN, J.M. (1993). Modeling continuous culture with periodic stocking and selective harvesting to measure the effect on productivity and

biomass capacity of fish culture systems. In: Wang, J.-K. (Ed.), *Techniques for Modern Aquaculture (Proc.)*, 21–23 June 1993, Spokane, WA. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, p.581–593.

SUMMERFELT, S. T., DAVIDSON, J. W., WALDROP, T. B., TSUKUDA, S. M., BEBAK-WILLIAMS, J. (2004). A partial-reuse system for coldwater aquaculture. *Aquacult. Eng.* 31, 157-181.

SUMMERFELT, S.T., SHARRER, M.J., TSUKUDA, S.M., GEARHEART, M. (2009). Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation *Aquacult. Eng.* 40, 17-27.

SEVILLA, A. & GUNTHER, J. (2000). Growth and feeding level in pre-weaning tambaqui *Colossoma macropomum* larvae. *Journal of the World Aquaculture Society* 31, p.218-224.

SPARRE, P. (1976). A Markovian decision process applied to optimization of production planning in fish farming *Meddr. Danm. Fisk. -og Havunders N.S.*, 7 pp. 111–197

TACON, A.G.J.; DE SILVA, S.S. (1997). Feed preparation and feed management strategies within semi-intensive fish farming system in the tropics. *Aquaculture*, v.151, p.379-404.

TEICHERT-CODDINGTON, D.R. (1996). Effect of stocking ration on semi-intensive polyculture of *Colossoma macropomum* and *Oreochromis niloticus* in Honduras, Central America. *Aquaculture*, v.143, p.291-302.

VAL, A. L.; ALMEIDA-VAL, V.M.F. (1995). *Fishes of the Amazon and their environment: physiological and biochemical features*. Springer-Verlag, Heidelberg, p.224.

WINSTON, W. L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms*. 4 ed. California: BrooksCole Thomson Learning.

WURMANN, C.F. (2010). *Situación actual y perspectivas de desarrollo de La acuicultura mundial*. FAO-Organização para Alimentação e Agricultura das Nações Unidas. Relatório Interno.

7. Considerações finais

No Amazonas pequenos piscicultores têm se desenvolvido com diferentes cenários de layout, em sistema semi-intensivo associados a diferentes custos. A falta de planejamento adequado para despesca é considerada uma variável de decisão importante, que afeta a rentabilidade do empreendimento. Estratégias de gestão podem ser estabelecidas para manipular e controlar processo de produção para o cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanque semiescavado, e modelos de otimização são uma alternativa a ser empregada e que pode auxiliar na tomada de decisão no planejamento de despesca peso alvo para o mercado, uma vez que o piscicultor não é capaz de definir qual a melhor estratégia do mix de peso para despesca, que irá otimizar a produção de biomassa, tendo como objetivo maximização do lucro.

Os resultados deste estudo sugerem através da simulação dos cenários layout 5 e 10 tanque, a despesca com mix de peso alvo 0,5 kg, 1 kg e 0,5 kg, 1 kg, 2 kg para a espécie tambaqui, no qual apresentaram melhores lucros operacionais proporcionais, devido ao seu valor mais elevado de mercado. No entanto, outros estudos poderão trazer melhores soluções, uma vez que foram identificados *gaps* (lacunas de tempo) entre as sucessivas fases de crescimento do peixe no tanque, e é uma alternativa de investigação que melhore o desempenho da produção de biomassa do tambaqui. Com o propósito de incluir os *gaps* e considerando o horizonte de tempo contínuo, estudos e um modelo mais geral de otimização já estão sendo construídos.

Referências

- ANKENMAN, Bruce E., Bekki, J. M., Fowler, J., Mackulak, G. T., Nelson, B. L., & Yang, F. (2011). Simulation in production planning: an overview with emphasis on recent developments in cycle time estimation. In: Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise. Springer US, p. 565-591.
- AOUAM, T., UZSOY, R. (2015) Zero-order production planning models with stochastic demand and workload-dependent lead times. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 6, p. 1661-1679.
- ATHERTON, R. W., DAYHOFF, J. E. (1986). Signature analysis: Simulation of inventory, cycle time, and throughput trade-offs in wafer fabrication. *Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on*, v. 9, n. 4, p. 498-507.
- ASCHE, Frank. Farming the sea. *Marine Resource Economics*, p. 527-547, 2008.
- ARBELAEZ-ROJAS, G. A.; FRACALOSSO, D.M.; FIM, J.D.I. (2002). Body composition of tambaqui, *Colossoma macropomum*, and matrinxã, *Brycon cephalus*, when raised in intensive (igarapé channel) and semi-intensive (pond) culture systems. *Brazilian Journal of Animal Science*, 31(3), 1059-1069.
- ARAÚJO-LIMA, C. A. R. M.; GOULDING, M. (1998). Os frutos do tambaqui: ecologia, conservação e cultivo na Amazônia. Tefé: Sociedade Civil Mamirauá; Brasília: CNPq, P.186.
- BALCI, O. (1998). Verification, validation, and testing. In *The handbook of simulation*, ed. J. Banks, Chapter 10. New York: John Wiley.
- BANKS, J. (1998). *Handbook of Simulation*. John Wiley & Sons, Inc. p.169-172. ISBN 0-471-13403-1
- BANKS, J., CARSON, J. S., NELSON, B. L., NICOL, D. M. (2005). Discrete-event system simulation. 4th ed. Upper Saddle River, N. J: Prentice-Hall.
- BERGER, J. (1985). *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. Springer-Verlag.
- BITRAN, G. R., TIRUPATI, D. (1993). Hierarchical production planning. *Handbooks in operations research and management science*, v. 4, p. 523-568.
- BONET, B. & GEFFNER, H. (2005). A probabilistic planner based on heuristic search. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 24(1):933-944.
- BLOM, J. G., KELLA, O., MANDJES, M.R.H., THORSODOTTIR, H. (2013). Markov-modulated infinite-server queues with general service times. *Life Sciences [LS]*, n. LS-1305, p. 1-16.
- BLUM, C., ROLI, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Over-view and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3):268-308.
- BJØRNDAL, T. (1988). Optimal harvesting of farmed fish. *Mar. Resour. Econ.* 5, 139-159.
- BJØRNDAL, T., Lane, D.E., Weintraub, A. (2004). Operational research models and the management of fisheries and aquaculture: a review. *European Journal of Operational Research* 156, 533-540.
- BRAUM, E.; JUNK, W.J. (1982). Morphological adaptation of two Amazonian characoids (Pisces) for surviving in oxygen efficient waters. *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, 67:869-886.

BUZACOTT, J. A., SHANTHIKUMAR, J. G. (1993). Stochastic models of manufacturing systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

CACHO, O.J. (1997). Systems modelling and bioeconomic modelling in aquaculture. *Aquaculture Economics & Management* 1, 45–64.

CARVALHO, M.L. Alimentação do tambaqui jovem *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1818) e sua relação com a comunidade zooplanctônica do lago Grande de Manaquiri, Solimões – AM. Tese de mestrado. INPA/FUA. 90P. (1981).

CAVERO, B.A.S.; RUBIM, M.A.L.; MARINHO-PEREIRA, T. (2009). Criação comercial do tambaqui, *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1818). In: TAVARES-DIAS, M. Manejo e sanidade de peixes em cultivo [recurso eletrônico]. Embrapa Amapá, p.33-46.

CAMPOS, C. P., COSTA SOUSA, R. G., CATARINO, M. F., de ALBUQUERQUE COSTA, G. and FREITAS, C. E. C. (2015), Population dynamics and stock assessment of *Colossoma macropomum* caught in the Manacapuru Lake system (Amazon Basin, Brazil). *Fisheries Management and Ecology*, 22: 400–406.

COSTA, LRF, BARTHEM, RB, ALBERNAZ, AL, BITTENCOURT, MM, VILLACORTA-CORRÊA, MA. (2013). Modelling the growth of tambaqui, *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1816) in floodplain lakes: model selection and multimodel inference. *Brazilian Journal of Biology*, 73(2), 397-403.

CORRÊA, H. L., CORRÊA, C. A. (2012). Administração de Produção e Operações: Manufatura E Serviços: Uma Abordagem Estratégica. 3 ed. São Paulo: Atlas.

CORDEIRO, J. & KHAROUFEH, J. (2012). The unreliable M/M/1 retrial queue in a random environment, *Stoch. Models* 28(1) p29–48.

COZMAN, F. G. (2000). Credal networks. *Artificial Intelligence*, 120(2):199–233.

COZMAN, F. G. (2005a). Graphical models for imprecise probabilities. *International Journal of Approximate Reasoning*, 39(2-3):167–184.

COZMAN, F. G. (2005b). Notas de aula da disciplina Probabilidades em Inteligência Artificial, Escola Politécnica - USP.

ESCUADERO, L. F., KAMESAM, P. V., KING, A. J., & WETS, R. J. (1993). Production planning via scenario modelling. *Annals of Operations Research*, 43(6), 309-335.

FAO. (2012). The State of World Fisheries and Aquaculture. FAO, Rome.

FAO (Food and Agriculture Organisation), IFAD (International Fund for Agricultural Development), & WFP (World Food Program) (2014). The state of food insecurity in the world 2014. Strengthening the enabling environment for food security and nutrition (Rome).

FORSBERG, O.I. (1996). Optimal stocking and harvesting of size-structured farmed fish: a multi-period linear programming approach, *Math. Comp. Simulat.* 42 p.299–305.

FORSBERG, O.I. (1999). Optimal harvesting of farmed Atlantic salmon at two cohort management strategies and different harvest operation restrictions, *Aquacult. Econ. Manage.* 3 p.143–158.

GRAEF, E.W. As espécies de peixes com potencial para criação no Amazonas. In: Criando peixes na Amazônia (Val, A.I. e Honczarik, A. Eds) INPA, Manaus. (1995).

- GROSS, D. (2008). *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th ed. Wiley, Hoboken, N.J.
- GROSS, D., SHORTLE, J. F., THOMPSON, J. M., HARRIS, C. M. (2009). *Fundamentals of Queueing Theory*, 4 ed., Wiley-Interscience, New York, NY, USA.
- GOLDRATT, E. M., COX, J. (2003). *A meta: um processo de melhoria contínua*. 2 ed. São Paulo: Nobel.
- GOULDING M., CARVALHO M.L. (1982). Life history and management of the tambaqui (*Colossoma macropomum*, Characidae): an important Amazonian food fish. *Revista Brasileira de Zoologia* 12, 107–133.
- GOMES, L. C.; SILVA, C. R. (2009). Impact of pond management on tambaqui, *Colossoma macropomum* (Cuvier), production during growth-out phase. *Aquaculture Research*, Oxford, v. 40, p. 825-832.
- HAJI, B., ROSS, S. M. (2015). M/G/∞ with exponentially distributed setup times. *Operations Research Letters*, v. 43, n. 1, p. 26-28.
- HALACHMI, I., (2007). Biomass management in re-circulating aquaculture systems using queuing networks. *Aquaculture* 262, 514–520.
- HALACHMI, I. (2012). Mathematical principles of a balanced layout design: Part I. 250-ton/year RAS Aquacultural Engineering, 50, pp. 1–10.
- HALACHMI, I. (2015). Simulation Optimization: Applications in Fish Farming—Theory vs. Practices. In: *Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food Industry*. Springer New York, p. 201-220.
- HACKMAN, S. T. (2007) *Production economics: integrating the microeconomic and engineering perspectives*. Springer Science & Business Media.
- HERNÁNDEZ, J.M., LEÓN-SANTANA, M., LEÓN, C.J. (2007). The role of the water temperature in the optimal management of marine aquaculture *European Journal of Operational Research*, 181 pp. 872–886.
- HIGLE, J. L., KEMPF, K. G. (2010). Production planning under supply and demand uncertainty: A stochastic programming approach. In: *Stochastic Programming*. Springer New York, p. 297-315.
- HOPP, W. J., SPEARMAN, M. L. (1996). *Factory Physics Foundations of Manufacturing Systems*. Irwin, Times Mirror, USA.
- HOWARD, R. A. (1960). *Dynamic Programming and Markov Process*. The MIT Press.
- IZEL, A. C. U., MELO, L. A. S. (2004). Criação de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em tanques escavados no Estado do Amazonas. Manaus-AM. Embrapa Amazônia Ocidental, (Doc. 32)
- JACOBY, D. M.P., CROFT, D. P., SIMS, D. W. (2011). Social behaviour in sharks and rays: analysis, patterns and implications for conservation. *Fish and Fisheries*, v. 13, n. 4, p. 399-417.
- JACOBY, D. M.P., BROOKS, E.J., CROFT, D. P. (2012). Developing a deeper understanding of animal movements and spatial dynamics through novel application of network analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 3, n. 3, p. 574-583.
- JIMOH, O., WEBSTER, P. (1996). The optimum order of a markov chain model for daily rainfall in Nigeria. – *J. Hydrol.* 185: 45 – 69.

- JOLLY, C.M, CLONTS, H.A. (1992). *Economics of Aquaculture*. New York:Food Products Press.
- KEMPF, K. G., KESKINOCAK, P., UZSOY, R. (2011). *Planning production and inventories in the extended enterprise: a state of the art handbook*. Springer Science & Business Media.
- KNILL, Oliver. (1994). *Probability and stochastic processes with applications*. Havard Web-Based, 1994.
- KRAJEWSKY, L., RITZMAN, L., MALHOTRA, M. (2009). *Administração da Produção e Operações*. 8 ed. São Paulo: Pearson.
- KONTU, K., FANG, T., LAHDELMA, R. (2013). Forecasting district heating consumption based on customer measurements. In: *Proceeding of 36th Euroheat & Power Congress*, May 27e. p. 16e20.
- KUBITZA, F. (2006). Questões frequentes dos produtores sobre a qualidade dos alevinos de tilápia. In: *Panorama da Aquicultura*, setembro/outubro, p.14 – 23.
- KLEIJNEN, J. P. C., SANCHEZ S. M., LUCAS T. W., CIOPPA, T. M. (2005). A user's guide to the brave new world of designing simulation experiment. *INFORMS Journal on Computing* 17(3):263-89.
- KUBITZA, F. and KUBITZA, LMM., (2000). Qualidade da água, sistemas de cultivo, planejamento da produção, manejo nutricional e alimentar e sanidade. *Panorama da Aquicultura*, vol. 10, no. 59, p. 44-53.
- LAW, A.M., KELTON, W.D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. Boston: McGraw-Hill.
- LEUNG, P. S. (1986). Applications of systems modelling in aquaculture. *Aquacult. Eng.*, 5, 183-97.
- LEUNG, P. S., SHANG, J. C. (1989). Modelling prawn production management systems: A dynamic markov decision approach. *Agril. 3ystems.*, 29.5-20.
- LI, Y., WU, X. (2016). A unified approach to time-aggregated Markov decision processes. *Automatica*, v. 67, p. 77-84.
- LIU, J., LI, C., YANG, F., WAN, H., & UZSOY, R. (2011). Production planning for semiconductor manufacturing via simulation optimization. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference* (pp. 3617-3627). Winter Simulation Conference.
- LIU, Z., YU, S. (2016). The M/M/C queueing system in a random environment. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, v. 436, n. 1, p. 556-567.
- LLORENTE, I., LUNA, L. (2014). Economic optimisation in seabream (*Sparus aurata*) aquaculture production using a particle swarm optimisation algorithm. *Aquaculture international* v.22 no.6 pp. 1837-1849.
- MARTINS, C.I.M., OCHOLA, D., ENDE, S.S.W., EDING, E.H., VERRETH, J.A.J. (2009b). Is growth retardation present in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* cultured in low water exchange recirculating aquaculture systems? *Aquaculture* 298, 43-50.
- MAHABHASHYAM, S. & GAUTAM, N. (2005). On queues with Markov modulated service rates, *Queueing Syst.* 51 p89–113.
- MELO, L. A. S.; IZEL, A. C. U.; RODRIGUES, F. M. (2001). Criação de Tambaqui (*Colossoma macropomum*) em viveiros de argila/barragens no Estado do Amazonas. Manaus: Embrapa

Amazônia Ocidental, 30 p. : il. ; 21 cm. – (Embrapa Amazônia Ocidental ; ISSN 1517-3135 ; 18).

MIRANDE, J. M. 2010. Phylogeny of the family Characidae (Teleostei: Characiformes): from characters to taxonomy. *Neotropical Ichthyology*, 8: 385-568.

MISSBAUER, H. (2011). Order release planning with clearing functions: a queueing-theoretical analysis of the clearing function concept. *International Journal of Production Economics*, v. 131, n. 1, p. 399-406.

NAYLOR, R.L., GOLDBURG, R.J., PRIMAVERA, J.H., KAUTSKY, N., BEVERIDGE, M.C.M., CLAY, J., FOLKE, C., LUBCHENCO, J., MOONEY, H., TROELL, M., (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405, 1017-1024.

NAYLOR, R.L., HARDY, R.W., BUREAU, D.P., CHIU, A., ELLIOTT, M., FARRELL, A.P., FORSTER, I., GATLIN, D.M., GOLDBURG, R., HUA, K., NICHOLS, P.D. (2009). Feeding aquaculture in na era of finite resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 8, 15103–15110.

OSMAN, I. H., LAPORTE, G. (1996). Metaheuristics: A bibliography. *Ann. Oper. Res.* 63, 513--623.

PARDOUX, E. (2008). Markov processes and applications: algorithms, networks, genome and finance. John Wiley & Sons.

PRÉKOPA, A. (2013). Stochastic programming. Springer Science & Business Media.

POCHET, Y., WOLSEY, L. A. (2006). Production planning by mixed integer programming. Springer Science & Business Media.

PIDD, M. (1992). Computer Simulation in Management Science, Wiley.

PAHL, J., VOß, S., WOODRUFF, D. L. (2007). Production planning with load dependent lead times: an update of research. *Annals of Operations Research*, v. 153, n. 1, p. 297-345.

PUTERMAN, M. L. (1994). Markov Decision Processes. John Wiley and Sons, New York.

QIU, Q., PEDRAM, M. (1999). Dynamic power management based on continuous-time Markov decision processes. In: *Proceedings of the 36th annual ACM/IEEE Design Automation Conference*. ACM, p. 555-561.

RUSSELL, S., NORVIG, P. (2002). Artificial Intelligence: A Modern Approach, 2nd ed. Prentice-Hall, NJ, USA.

SAINT-PAUL, U. (1984). Physiological adaptation to hypoxia of a neotropical characoid fish *Colossoma macropomum*, Serrasalminidae. *Env. Biol. Fish.*, vol. 11, no. 1, p. 53-62.

SAINT PAUL, U. (1985). The neotropical serrasalminid *Colossoma macropomum*, a promising species for fish culture in Amazonia. *Animal Research and Development*, 22: 7-31.

SAINT PAUL, U. (1986). Potential for aquaculture of South American freshwater fishes: a review. *Aquaculture*, 54:205-240.

SOUSA, R. G. C., FREITAS, C. E. C. (2010). Seasonal catch distribution of tambaqui (*Colossoma macropomum*), Characidae in a central Amazon floodplain lake: implications for sustainable fisheries management. *Journal. Applied Ichthyology*. 27, 118–121.

SILVA, P. C., KRONKA, S. N., TAVARES, L. H. S., SOUSA JÚNIOR, R. P., SOUZA, V. L. (2003). Avaliação econômica da produção da tilápia nilótica em tanques com diferentes trocas de água e densidades populacionais no sistema Raceway. *Acta Scientiarum*, v. 25, n. 1, p. 9-13.

SILVA, C.R.; GOMES, L.C.; BRANDÃO, F.R. (2007). Effect of feeding rate and frequency on tambaqui (*Colossoma macropomum*) growth, production and feeding costs during the first growth phase in cages. *Aquaculture*, v.264, p.135-139. DOI: 10.1016/j.

SANTOS, E.P. (1978). Dinâmica de população aplicada à pesca e piscicultura. São Paulo: HUCITEC. 129 p.

SANTOS, E.P.; SILVA, A.B.; LOVSHIN, L.L. (1976). Análise quantitativa em um ensaio de piscicultura intensiva com pirapitinga, *Colossoma bidens*. *Bol. Tec. DNOCS*, 34 (2).

SARSIS M.; LIM J. & HAGOOD R.W. (2001). Growth, survivorship, and nutrient uptake of giant clams (*Tridacna*) in aquaculture effluent. *Journal Of Shellfish Research* 20 (1): 171-176.

SCHMITTOU, H.R. (1993). Produção de peixes em altas densidades em tanques-rede de pequeno volume. Associação Americana de Soja. Ed. Silvio Romero C. Coelho. Mogiana Alimentos S/A. Campinas, SP. 78p.

STEHFEST, Kilian M. et al. (2015). Markov models and network analysis reveal sex-specific differences in the space-use of a coastal apex predator. *Oikos*, v. 124, n. 3, p. 307-318.

SUMMERFELT, S.T., HANKINS, J.A., SUMMERFELT, S.R., HEINEN, J.M. (1993). Modeling continuous culture with periodic stocking and selective harvesting to measure the effect on productivity and biomass capacity of fish culture systems. In: Wang, J.-K. (Ed.), *Techniques for Modern Aquaculture (Proc.)*, 21–23 June 1993, Spokane, WA. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, p.581–593.

SUMMERFELT, S. T., DAVIDSON, J. W., WALDROP, T. B., TSUKUDA, S. M., BEBAK-WILLIAMS, J. (2004). A partial-reuse system for coldwater aquaculture. *Aquacult. Eng.* 31, 157-181.

SUMMERFELT, S.T., SHARRER, M.J., TSUKUDA, S.M., GEARHEART, M. (2009). Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation *Aquacult. Eng.* 40, 17-27.

SEVILLA, A. & GUNTHER, J. (2000). Growth and feeding level in pre-weaning tambaqui *Colossoma macropomum* larvae. *Journal of theWorld Aquaculture Society* 31, p.218-224.

SPARRE, P. (1976). A Markovian decision process applied to optimization of production planning in fish farming *Meddr. Danm. Fisk. -og Havunders N.S.*, 7 pp. 111–197

TACON, A.G.J.; DE SILVA, S.S. (1997). Feed preparation and feed management strategies within semi-intensive fish farming system in the tropics. *Aquaculture*, v.151, p.379-404.

TEICHERT-CODDINGTON, D.R. (1996). Effect of stocking ration on semi-intensive polyculture of *Colossoma macropomum* and *Oreochromis niloticus* in Honduras, Central America. *Aquaculture*, v.143, p.291-302.

TIRDAD, A., GRASSMANN, W., TAVAKOLI, J. (2016). Optimal policies of M (t)/M/c/c queues with two different levels of servers. *European Journal of Operational Research*, v. 249, n. 3, p. 1124-1130.

TREVIZAN, F. W., COZMAN, F. G., BARROS, L. N. (2007). Planning under risk and Knightian uncertainty. *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pages 2023–2028, Hyderabad, India.

VAL, A. L.; ALMEIDA-VAL, V.M.F. (1995). Fishes of the Amazon and their environment: physiological and biochemical features. Springer-Verlag, Heidelberg, p.224.

VOß, S., WOODRUFF, D. L. (2006). Introduction to computational optimization models for production planning in a supply chain. Springer Science & Business Media.

WANG, J., CHANG, Q., XIAO, G., WANG, N., & LI, S. (2011). Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant. *Computers in Industry*, 62(7), 765-775.

WINSTON, W. L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms*. 4 ed. California: BrooksCole Thomson Learning.

WURMANN,C.F. (2010). Situación actual y perspectivas de desarrollo de La acuicultura mundial. FAO- Organização para Alimentação e Agricultura das Nações Unidas. Relatório Interno.