

Caracterização limnológica e aplicação do modelo DPSIR visando à avaliação integrada de bacias hidrográficas lacustres

Limnological characterization and application of DPSIR model aimed at integrated assessment of lacustrine hydrographic basins

Fabiola Chrystian Oliveira Martins¹

Resumo

Este trabalho apresenta a aplicação do modelo conceitual *Driving Force – Pressure – State – Impact – Response* (DPSIR) para classificação dos indicadores ambientais quanto aos indutores (D), pressões (P), estado (S) e impactos no ecossistema lacustre (I) e as respostas (R) dos gestores, apresentando como estudo de caso a lagoa Juparanã (ES). Os indutores equivalem às atividades que refletem o uso da terra da bacia hidrográfica que mais provocam pressões na lagoa. A urbanização apresentou reduzido percentual de ocupação, porém a falta de resposta da gestão tende a torná-la uma atividade geradora de significativas pressões neste ecossistema. Agricultura e pastagem apresentaram relevantes percentuais de contribuição na bacia hidrográfica. Piscicultura é uma atividade em expansão desordenada, influenciando diretamente a coluna d'água. Os indicadores de estado do ecossistema aquático, representados pela caracterização sazonal das variáveis limnológicas mostraram a importância da abordagem limnológica na avaliação ambiental integrada, revelando-se eficazes na demonstração do impacto ao ecossistema, subsidiando o gestor na tomada de decisão.

Palavras-chave: lagoas costeiras; limnologia; indicadores.

Abstract

This paper presents the application of the *Driving Force – Pressure – State – Impact – Response* (DPSIR) conceptual model for classification of environmental indicators as to inducers (D), pressure (P), state (S) and impacts on lacustrine ecosystem (I) and responses (R) of managers, focusing on the *Juparanã* lake (ES) as a case study. The inducers are equivalent to activities that reflect the land use

¹ Dra.; Bióloga; Professora efetiva do Instituto Federal do Espírito Santo, IFES, *Campus* Guarapari: Endereço: Estrada da Tartaruga, s/nº, Muquiçaba, CEP: 29215-090, Guarapari, Espírito Santo, Brasil; E-mail: fabiolachrystian@gmail.com

of the hydrographic basin that cause pressure in the lake. Urbanization showed reduced percentage of occupation; however the lack of management response tends to make it a generating activity of significant pressures in the ecosystem. Agriculture and pasture presented relevant percentages of contribution in the basin. Fish farming is an activity in disordered expansion, influencing directly the water column. Status indicators of the aquatic ecosystem, represented by seasonal characterization of limnological variables showed the importance of the limnological approach to the integrated environmental assessment, proving to be effective in demonstrating the impact on the ecosystems, supporting the manager in the decision making process.

Key words: coastal lakes; limnology; indicators.

Introdução

Nos processos de avaliação ambiental integrada uma das principais etapas refere-se à definição de um modelo com o objetivo de determinar e simplificar o que vai ser avaliado, visando selecionar e organizar questões que vão definir o que vai ser medido pelos indicadores. Modelos conceituais, mesmo não refletindo com exatidão um sistema e sua real complexidade, fornecem informações de como podem funcionar e orientam a melhor forma de como lidar com ele (VAN BELLEN, 2005). Em uma visão sistêmica, a bacia hidrográfica é entendida como um complexo sistema aberto em que seus elementos biológicos, sociais e econômicos se encontram em estreita inter-relação, através de fluxos, influências e linhas de ação que atravessam suas fronteiras (LAURA, 2004).

A Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD - *Organization for Economic Cooperation and Development*) foi uma das pioneiras no desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade, através da criação da estrutura conceitual baseada na causalidade sobre indicadores ambientais, conhecida como Pressão - Estado - Resposta (PSR: *Pressure - State - Response*) (OECD, 1994),

posteriormente reestruturada para o modelo *Driving Force - Pressure - State - Impact - Response* (DPSIR). De acordo com Fidalgo (2003) e Zacharias et al. (2008), a partir da estrutura PSR, Smeets e Weterings descreveram, em 1999, um modelo para o desenvolvimento de indicadores ambientais proposto pela Agência Europeia de Meio Ambiente (EEA - *European Environmental Agency*) denominado Forças motrizes - Pressões - Estado - Impactos - Resposta (*Driving Force - Pressure - State - Impact - Response: DPSIR*), em que as forças motrizes foram adicionadas para ajustar adequadamente os indicadores sociais, econômicos, institucionais e ambientais. Segundo Beu (2008) o modelo DPSIR procura, portanto, associar as forças motrizes subjacentes às pressões que estão ocorrendo no meio ambiente, alterando o seu estado. Essas alterações podem causar impactos que necessitam de respostas da sociedade de maneira a modificar ou minimizar o efeito das ações humanas. As respostas geralmente correspondem a ações gerenciais que podem ser direcionadas a todos ou a qualquer elemento do modelo.

O modelo DPSIR já vem sendo utilizado no gerenciamento costeiro integrado e na gestão de ecossistemas

aquáticos conforme citado em Clark (1996), Pirrone et al. (2005), Borja et al. (2006), Lin, Xue e Lu (2007) e Zacharias et al. (2008). No Brasil, dentre os estudos de avaliação ambiental utilizando este modelo destacam-se as contribuições de Beu (2008), na região estuarino-lagunar de Iguape-Cananéia (SP), Hort (2008) na zona costeira de Santa Catarina e Lélis (2010) nas lagoas Jacuném e Juara (ES). Segundo este último autor, o modelo DPSIR contempla aplicações de caráter espacial, variando do local ao internacional, tratando de questões chave em um universo menor, como a eutrofização em uma lagoa costeira, mas também questões mais amplas como a gestão integrada de bacias hidrográficas e zonas costeiras.

Esta amplitude analítica é atribuída ao papel que os indicadores ambientais têm de constituir, assim como fomentar, diferentes etapas do modelo DPSIR, pois demonstram a atual situação do ecossistema, para que seu uso e manejo sejam efetuados da melhor forma. E, desta maneira, o modelo assume uma estrutura sistêmica de integração, funcionando a partir de *inputs* e *outputs* no sistema (BEU, 2008).

Como as lagoas costeiras são ecossistemas particularmente ameaçados, em função da forte pressão da ocupação desordenada da sua bacia hidrográfica de entorno, tipicamente observada nos países em desenvolvimento (BARROSO, 2007; ESTEVES et al., 2011), são sistemas que demandam a utilização de um conjunto de estratégias para subsidiar seu gerenciamento, como a aplicação do modelo DPSIR baseado em indicadores selecionados a partir da avaliação e monitoramento limnológico. Este tipo de abordagem torna-se relevante, em termos de estratégias facilitadoras do mecanismo de gerenciamento lacustre,

pois as lagoas costeiras oferecem uma gama de bens e serviços para a população residente na zona costeira, os quais se encontram ameaçados pela degradação antrópica. Portanto, esta pesquisa se reveste de fundamental importância por utilizar a avaliação limnológica e a análise uso e ocupação da terra, a fim de apontar indicadores ambientais que atuem como adequados descritores das condições do meio, dentro de um contexto integrado, através da aplicação do modelo DPSIR e, desta forma, fornecer uma ferramenta acessível e aplicada para subsidiar o gerenciamento lacustre e a tomada de decisões.

Assim, o objetivo deste trabalho foi classificar as variáveis limnológicas, utilizadas como indicadores ambientais lacustres e as classes de uso e ocupação da terra no modelo DPSIR, através de uma abordagem descritiva e qualitativa, relacionando os prováveis impactos antrópicos ocorridos na bacia hidrográfica lacustre, suas causas e consequências a fim de subsidiar a indicação de medidas que possam ser tomadas para mitigar os impactos negativos sobre o ecossistema lacustre avaliado como caso: a lagoa Juparanã (Espírito Santo).

Material e Métodos

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Doce está localizada na região sudeste do Brasil, entre os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, nos paralelos 17°45' e 21°15' de latitude Sul e nos meridianos 39°55' e 43°45' de longitude Oeste. Segundo Barroso (2007), a região do baixo rio Doce (Espírito Santo), onde se insere a lagoa Juparanã, possui 90 lagoas, o que

corresponde a uma área total lacustre de 165 km², representando um dos mais importantes sistemas lacustres costeiros do Brasil. Quanto à gênese, as lagoas costeiras da região do baixo rio Doce são classificadas em externas e internas (Figura 1), sendo as lagoas externas (margem direita do rio Doce) localizadas entre o platô terciário e a planície costeira quaternária, com dimensões variando de 1 a 10 km, e as lagoas internas (margem esquerda do rio Doce) presentes sobre os tabuleiros de Formação Barreiras, limitadas pela planície aluvial do mesmo, além de apresentarem maiores dimensões, com destaque para lagoa Juparanã, a maior desta região, com 25 km de extensão e 22 m de profundidade máxima (HATUSHIKA et al., 2007). A lagoa Juparanã possui 62,06 km² de área, 2.995,7 km de extensão de córregos em sua bacia de drenagem, 1,3 km de densidade de drenagem, 109 barragens ocupando 0,58 km² de área, índice límnic de 2,7% e fator de envolvimento de 37,23 (BARROSO; MELLO, 2013).

A região apresenta o tipo climático Aw que, de acordo com a classificação de William Köppen, é caracterizado como tropical quente e úmido, com chuvas de verão e com inverno seco (SUGUIO et al., 1982). De acordo com esta classificação, o clima do tipo A apresenta temperaturas médias do mês mais frio superiores a 18 °C, sendo a subclassificação Aw atribuída ao clima caracterizado por período seco bem definido. Segundo Aprile et al. (2004) a pluviosidade média anual na região do baixo rio Doce é de 1.232,3 mm/ano, sendo que as precipitações máximas ocorrem entre dezembro e janeiro com médias de 244,4 mm, e as mínimas em julho com médias de 50,3 mm. As direções de ventos predominantes na região são nordeste, associados às brisas

marinhas com atuação durante o dia, e sudeste, relacionado às passagens de frentes frias que ocasionalmente invadem a região, sendo mais frequente no inverno (SUGUIO et al., 1982).

Variáveis Meteorológicas e Limnológicas

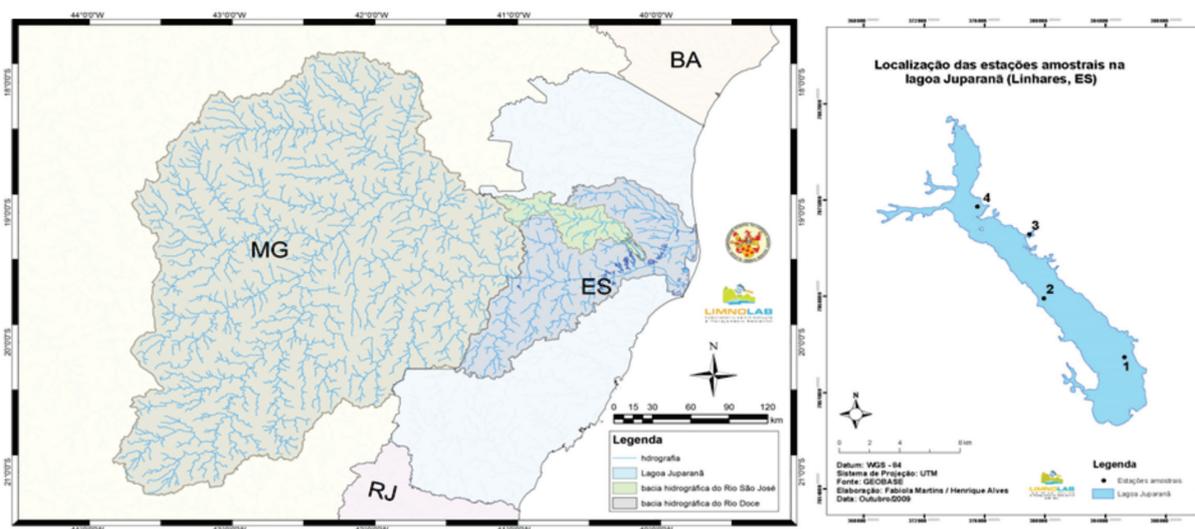
Os dados de pluviosidade, temperatura do ar, radiação solar, velocidade e direção dos ventos foram obtidos na base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), cuja estação meteorológica próxima à lagoa Juparanã encontra-se situada sob as coordenadas 19°40' S e 40°06' W.

Foram realizadas onze amostragens, sendo seis no verão (período chuvoso) e cinco no inverno (período seco), em intervalos semanais nos respectivos períodos. No verão, as amostragens ocorreram nos meses de novembro e dezembro de 2009 e janeiro e fevereiro de 2010. No inverno, nos meses de junho, julho e agosto de 2010.

A profundidade total de cada estação foi determinada com profundímetro Speedtech Depthmate. A transparência da água foi estimada a partir da média de descida e subida do disco de Secchi. A partir do valor obtido da transparência da água foi então estimado o limite da zona eufótica (Z_{eu}), admitindo a profundidade de incidência de 1% de luz, multiplicando-o pelo fator de conversão 2,7, conforme Cole (1994).

Nas quatro estações amostrais foram realizadas perfilagens da subsuperfície até o fundo da coluna d'água, a cada 0,5 m, da temperatura da água (°C), pH, concentração de oxigênio dissolvido (% de saturação), condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e concentração de sólidos totais dissolvidos (mg/L), utilizando medidor multiparâmetros Horiba US-50.

Figura 1 - Localização bacia hidrográfica do rio São José, onde está inserida a lagoa Juparanã (ES), com destaque para localização das estações amostrais (E1, E2, E3 e E4)



Na subsuperfície, na profundidade da zona eufótica (1% de luz) e no fundo da coluna d'água foram coletadas amostras de água, utilizando garrafa de Niskin, para determinação da concentração de fósforo total (P-total), ortofosfato ($P-PO_4^{3-}$), nitrito ($N-NO_2^-$), íon amônio ($N-NH_4^+$), clorofila *a* e feopigmentos, material particulado em suspensão e turbidez, sendo esta última analisada imediatamente, através de turbidímetro LaMotte 2020. Para determinação de $P-PO_4^{3-}$, $N-NO_2^-$ e $N-NH_4^+$, clorofila *a* e feopigmentos as amostras foram transportadas ao laboratório sob baixa refrigeração.

No laboratório, a determinação das concentrações de $P-PO_4^{3-}$ e P-total foram realizadas segundo o método do ácido ascórbico, conforme descrito em Carmouze (1994). A determinação da concentração de $N-NO_2^-$ ocorreu através da reação com sulfanilamida diazotada e n- (1 naftil) etilenodiamina

dihidroclorato, enquanto a determinação da concentração de $N-NH_4^+$ foi realizada segundo o método do indofenol, ambos conforme o mesmo autor. Todas as análises foram realizadas utilizando espectrofotômetro Micronal B 582; e os resultados foram expressos em $\mu g/L$.

Para determinação da concentração de clorofila *a* e feopigmentos as amostras foram filtradas em filtros de fibra de vidro Whatman 934 - AH, 24 mm de diâmetro e 1,2 um de porosidade. Posteriormente, submetidas a extração pigmentar utilizando acetona 90% como solvente e analisadas por fluorimetria, conforme Strickland e Parsons (1960) adaptado por Barroso e Littepage (1998).

A partir dos valores da transparência da água e das concentrações de clorofila *a*, $P-PO_4^{3-}$ e P-total calculou-se o índice de estado trófico (IET) modificado para ambientes tropicais, de acordo com Toledo et al. (1983) a fim de caracterizar a variação sazonal do estado trófico na lagoa Juparanã.

A estatística descritiva foi utilizada para avaliar o padrão do conjunto de dados obtidos durante o período amostral, através dos cálculos da média e desvio padrão. Como os dados apresentaram características não-paramétricas, realizou-se análise de Kruskal-Wallis (ZAR, 1999) e de comparação múltipla de Mann-Whitney para avaliar as diferenças das variáveis limnológicas entre as estações e profundidades amostrais e entre o verão e o inverno, respectivamente, a um nível de significância de 5%. A Análise de Componentes Principais (ACP) foi utilizada para ordenação das variáveis limnológicas, a partir da utilização dos valores normalizados, expressando as inter-relações entre as mesmas em um menor número de fatores. Todas as análises estatísticas foram realizadas através do *software* STATSOFT STATISTICA.

Uso e Ocupação da terra

Para avaliação do uso e ocupação da terra, a base cartográfica foi desenvolvida através de Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGIS 9.3 ESRI, utilizando coordenadas UTM e datum WGS 1984. O mapeamento do uso da terra foi baseado na classificação supervisionada de imagens de satélite Landsat 5 TM de 2010, realizada pelo Instituto Jones do Santos Neves - IJSN.

A delimitação da bacia hidrográfica da lagoa Juparanã foi feita a partir de curvas de nível de 10 m geradas em um modelo digital de terreno (MDT), o qual foi gerado a partir de imagens provenientes da Missão *Shuttle Radar Topography* e corrigidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil - Topodata. O polígono da bacia foi gerado a partir de aplicativos do módulo

Hydrology do ArcMap ESRI, a partir dos MDT, e posteriormente utilizado para recorte do uso da terra e da hidrografia. A rede fluvial foi determinada a partir da Base de Dados Georeferenciada do Estado do Espírito Santo (GEOBASES), cuja escala original é 1:100.000. O polígono da lagoa foi digitalizado em tela sobre o ortomosaico 1:15.000 de 2008 do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). A rede fluvial foi ajustada manualmente sobre os vales fluviais, utilizando as curvas altimétricas de 10 m e o ortomosaico como orientação. Para delimitação do entorno dos córregos e da lagoa foi gerado um *buffer* de 30 a 100m, respectivamente, servindo como recorte para o uso da terra. As áreas da bacia, da lagoa e uso da terra foram calculadas em m² e convertidas para km².

As classes de uso e ocupação da terra da área da bacia hidrográfica e do entorno dos córregos e da lagoa consideradas foram culturas, área urbana, florestas, pastagem, silvicultura, alagados, áreas de mineração, corpos hídricos (água) e afloramento rochosos. Posteriormente, estas classes foram agrupadas em três grupos, conforme o critério de compartimentação da paisagem de Odum e Odum (1972) e Odum (1983) em sistemas naturais, sistemas seminaturais e sistemas urbano-industriais. A avaliação também considerou a relação do uso e ocupação da terra com a área da lagoa, o fator de envolvimento lacustre - que representa a proporção entre a área de drenagem e a área da lagoa, sendo que quanto maior o fator de envolvimento menor é a capacidade de diluição frente ao material transportado pela bacia - a extensão dos córregos na bacia hidrográfica da lagoa Juparanã, o número de barragens e a área de ocupação das mesmas.

Aplicação do Modelo DPSIR

A aplicação do modelo conceitual DPSIR para os indicadores ambientais foi conduzida em três etapas: definição de critérios de classificação, classificação dos indicadores e estrutura do modelo aplicada à lagoa Juparanã.

A definição dos critérios para classificação dos indicadores limnológicos seguiu a proposta da *Water Framework Directive* (WFD) a partir da abordagem de Borja et al. (2006), uma vez que estes autores citam que para análise de bacias hidrográficas deve-se considerar a descrição dos indutores, principalmente uso da terra; a identificação de pressões com possíveis impactos no corpos hídricos e nos usos da água e a avaliação dos impactos resultantes das pressões, através de indicadores de estado ecossistêmico (Quadro 1).

Resultados e Discussão

Variáveis Limnológicas

O teste de Mann-Whitney mostrou que não houve diferença significativa entre o verão e o inverno para concentração de

amônio, pH e oxigênio dissolvido, verificando, portanto a sazonalidade para as demais variáveis limnológicas. Entretanto, não foram registradas diferenças significativas para as variáveis limnológicas entre as estações e profundidades amostrais, através da aplicação do teste de Kruskal-Wallis.

Tanto no verão quanto no inverno foi registrada a ocorrência de chuvas, porém sem diferença estatisticamente significativa entre os períodos avaliados, sendo os maiores valores registrados no verão. Segundo dados históricos da região estudada, a pluviosidade média anual é de 1.232,3 mm/ano, com valores máximos (244,4 mm) entre os meses de dezembro e janeiro e valores mínimos (50,3 mm) em julho, sendo os dados registrados no período de estudo atípicos para esta variável. Os valores da temperatura do ar foram maiores no verão se comparados aos do inverno, com diferença significativa entre os períodos. Quanto aos ventos, no verão, houve predomínio de ventos do quadrante nordeste e no inverno do quadrante sudeste, sendo a diferença entre os períodos, estatisticamente significativa.

Na bacia hidrográfica do rio São José, à qual pertence a lagoa Juparanã,

Quadro 1 - Indicadores do modelo DPSIR proposto pela WFD	
Indicadores	Definição
Força Motriz ou Indutores (D)	As atividades antropogênicas devem causar efeitos ambientais (indústria, agricultura).
Pressão (P)	O efeito direto das forças motrizes (efeitos que causem mudanças no escoamento do corpo hídrico ou mudança na química da água).
Estado (S)	As condições dos corpos hídricos resultante dos fatores naturais e antropogênicos (características físicas, químicas e biológicas)
Impacto (I)	A reação do meio ambiente às pressões (mortalidade de peixes, mudanças no ecossistema).
Resposta (R)	As medidas tomadas para melhorar o estado dos corpos hídricos (restrição ao uso, limitação do número de pontos poluentes, melhoria nas práticas de agricultura).

Fonte: Water Framework Directive – WFD (2002).

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis limnológicas abióticas nas estações amostrais E1, E2, E3 e E4, durante o período estudado, na lagoa Juparanã (ES)

(continua)

Variável (unidade de medida)		Verão				Inverno			
		E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
Temperatura da água (°C)	Max	31,1	30,1	30,4	30,9	23,9	23,9	24,1	24,1
	Min	26,9	26,7	26,9	26,9	22,7	22,4	22,6	22,6
	Med	28,6	28,5	28,7	28,8	23,2	23,2	23,3	23,3
	DesPad	0,9	1,0	1,0	1,2	0,4	0,4	0,4	0,5
Turbidez (NTU)	Max	42,9	22,4	23,3	25,9	11,7	42,7	9,1	39,0
	Min	4,8	3,8	5,7	5,8	2,5	2,8	4,1	3,4
	Med	18,8	13,9	15,8	16,6	5,1	8,9	7,2	9,3
	DesPad	11,1	6,6	5,4	6,3	2,2	9,6	1,4	8,7
Material Particulado em Suspensão - MPS (mg/L)	Max	12,3	5,6	7,6	9,9	8,6	14,4	6,7	32,2
	Min	0,8	1,1	0,2	1,0	0,5	1,8	2,2	2,0
	Med	5,4	3,6	3,6	3,5	3,4	5,3	4,3	7,1
	DesPad	3,5	1,4	2,0	2,5	2,0	3,2	1,4	8,5
Profundidade Máxima (m)	Max	13,0	12,0	7,0	8,7	11,5	11,5	5,6	7,3
	Min	11,5	9,5	5,7	7,5	10,5	11,0	5,2	7,0
	Med	12,4	11,0	6,3	8,1	11,0	11,3	5,4	7,1
	DesPad	0,6	1,0	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Transparência (m)	Max	1,6	1,8	1,6	1,6	2,7	2,5	2,1	2,0
	Min	0,7	0,7	0,6	0,7	1,5	1,7	1,5	1,4
	Med	1,0	1,2	0,9	1,0	2,3	2,0	1,8	1,8
	DesPad	0,4	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2
Zona Eufótica – Z_{eu} (m)	Max	4,2	4,86	4,30	4,15	7,95	7,5	6,3	5,9
	Min	1,8	1,9	1,6	1,9	4,1	4,5	4,1	3,8
	Med	2,7	3,2	2,4	2,6	6,6	5,9	5,0	5,1
	DesPad	1,1	1,2	1,0	0,8	1,5	1,1	0,8	0,9
Condutividade Elétrica – CE (μ S/cm)	Max	93,0	92,0	95,0	106,0	151,0	146,0	146,0	150,0
	Min	66,0	72,0	78,0	79,0	136,0	95	143	143
	Med	80,9	82,0	82,3	85,0	142,8	141,6	143,9	147,1
	DesPad	6,2	5,4	4,5	5,9	1,5	6,5	1,0	1,8
pH	Max	9,4	9,8	9,4	8,6	8,1	8,1	7,6	8,6
	Min	4,5	6,0	6,4	5,7	6,7	6,4	6,8	6,2
	Med	7,6	7,5	7,6	7,4	7,4	7,3	7,3	7,5
	DesPad	2,0	0,9	0,8	0,7	0,4	0,5	0,3	0,7

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis limnológicas abióticas nas estações amostrais E1, E2, E3 e E4, durante o período estudado, na lagoa Juparanã (ES)

<i>(conclusão)</i>									
Oxigênio Dissolvido - OD (% saturação)	Max	195,2	157,3	158,7	156,9	134,2	141,6	116,7	141,7
	Min	43,2	40,2	43,7	42,9	52,5	47,8	52,5	42,1
	Med	93,9	79,0	89,5	88,6	75,8	86,5	81,5	76,7
	DesPad	34,1	24,2	26,2	27,4	15,9	24,0	19,3	22,0
P-total (µg/L)	Max	61,5	48,1	68,5	150,9	43,3	111,4	42,1	51,9
	Min	34,4	34,1	33,5	35,2	30,8	30,8	31,2	31,0
	Med	43,8	39,9	42,0	55,2	33,5	41,3	34,0	35,0
	DesPad	9,1	4,0	9,4	34,4	3,1	21,0	3,1	5,2
P-PO ₄ ³⁻ (µg/L)	Max	42,4	40,5	43,5	43,5	38,6	35,7	35,7	33,0
	Min	32,7	32,7	32,7	32,4	26,3	28,3	28,3	30,3
	Med	36,5	35,7	35,8	35,8	30,7	31,9	31,9	31,6
	DesPad	2,6	2,2	3,0	3,1	2,9	1,7	2,0	1,0
N-NO ₂ ⁻ (µg/L)	Max	13,9	13,7	13,9	13,8	12,7	12,6	12,6	12,5
	Min	12,5	12,8	12,5	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
	Med	13,1	13,3	13,1	13,1	12,5	12,5	12,5	12,5
	DesPad	0,4	0,3	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,0
N-NH ₄ ⁺ (µg/L)	Max	7,8	7,8	7,0	7,3	7,0	7,8	7,0	7,0
	Min	6,5	6,4	6,5	6,5	6,4	6,4	6,4	6,4
	Med	6,8	6,8	6,7	6,7	6,6	6,7	6,6	6,7
	DesPad	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2

Fonte: Martins, F. C. O. (2015)..

os resultados mostraram um regime de pluviosidade sazonal, com distinção entre período chuvoso e um período seco atípico, separados por um período de transição pouco definido, em função da presença de chuvas esparsas. A sazonalidade da pluviosidade na região atua como uma força controladora da dinâmica hidrológica, o que pôde ser evidenciado nesta pesquisa, principalmente, pelas variações na profundidade das estações amostrais durante o período estudado (Tabela 1). Segundo Figueiredo (2007), associado a este fator ocorrem importantes mudanças na concentração de substâncias e no funcionamento do ecossistema aquático,

as quais foram registradas para a lagoa Juparanã, com relação à dinâmica das variáveis limnológicas.

Segundo Lewis (1987) as variáveis meteorológicas sazonais e eventos imprevisíveis influenciam o regime térmico das lagoas tropicais, sendo as modificações provocadas pelo vento, em função, por exemplo, da passagem de frentes frias, apontadas por Stech e Lorenzetti (1992) e Tundisi et al. (2004), como eventos imprevisíveis capazes de promover a desestratificação da coluna d'água. Na lagoa Juparanã a condição de mistura é predominante ao longo do ano, sendo

observadas microestratificações no verão. Segundo Frazen (2009), em ecossistemas lacustres, o aquecimento provocado pelo sol e a ação do vento sobre a superfície da água criam diferenças horizontais e verticais na massa líquida. Esta mesma autora cita que a estratificação térmica em ecossistemas aquáticos lênticos, como as lagoas, é resultado do balanço de calor entre a água armazenada e as contribuições externas, incluindo a radiação solar, troca indutiva de calor entre a atmosfera e a água, e o calor dos tributários. A perda de calor pode ser por emissão de radiação da superfície da lagoa de volta para atmosfera, por evaporação, condução ou através das vazões efluentes. Como os processos de aquecimento e resfriamento ocorrem em uma camada relativamente fina, se não houver mistura vertical para destruir o gradiente de calor, ocorrerá estratificação térmica. Entretanto, isto não foi observado na lagoa Juparanã, pois a ausência de gradiente térmico na coluna d'água está atribuída à reduzida profundidade do ecossistema associada à ação dos ventos e contribuição dos afluentes das bacias de entorno.

A descrição do efeito das variáveis meteorológicas em uma escala temporal sazonal constitui um instrumento de aproximação do regime dinâmico, atuando para explicar as variáveis limnológicas em um contexto físico apropriado. Os processos de mistura e transporte dentro de um ecossistema aquático determinam a resposta ecológica do sistema às forçantes meteorológicas e aos fluxos de entrada e saída (FRAZEN, 2009).

Nos períodos de temperaturas mais elevadas, por exemplo, a densidade da água superficial torna-se inferior à da camada do fundo e a estratificação química também pode ser observada em variáveis como

a concentração de oxigênio dissolvido. Entretanto, segundo Esteves e Furtado (2011), em ecossistemas lacustres de regiões tropicais, frequentemente observa-se estratificação química, principalmente do oxigênio dissolvido, independente da estratificação térmica, o que foi observado na lagoa Juparanã. Neste ecossistema, não foi registrada condição de anoxia no fundo da coluna d'água, porém as concentrações foram diminuindo a partir de superfície, caracterizando um perfil do tipo clinogrado, conforme também observado por Huszar et al. (1994) e Gonçalves (2005) neste mesmo ecossistema. A coluna d'água apresentou-se oxigenada durante todo o período amostral, com valores acima de 70% de saturação, principalmente no verão. Bozelli et al. (1992) justificaram o perfil clinogrado obtido na lagoa Juparanã como consequência da camada trofotônica atingir o metalímnio em função da maior disponibilidade de nutrientes e menor pressão da herbivoria, favorecendo a elevação da densidade fitoplantônica.

Quanto aos nutrientes, durante o verão, a concentração de P-total apresentou variações dos valores ao longo das amostragens nas estações 1 e 4, com tendência constante nas estações 2 e 3. O maior valor médio registrado no verão foi na estação 4 (55,2 µg/L) e no inverno foi na estação 2 (41,3 µg/L). A concentração de P-PO₄³⁻ apresentou, de modo geral, homogeneidade dos valores, tanto no verão quanto no inverno. As variações entre superfície, profundidade da z_{eu} (zona eufótica) e fundo da coluna d'água foram mais acentuadas no verão do que no inverno, no qual se observou sobreposição dos valores nas estações 3 e 4. A concentração de N-NH₄ manteve-se praticamente constante entre as estações,

nas três profundidades amostradas, tanto no verão quanto no inverno, sendo este o único nutriente inorgânico dissolvido cujos valores não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. As concentrações de N-NO²⁻ foram maiores que as de N-NH⁴. As concentrações de nitrato não foram avaliadas nesta pesquisa.

Jorgensen e Vollenweider (2000) citam que a disponibilidade de nutrientes no metalímnio, dentre eles os nitrogenados, é resultado do chamado “prato nítrico” devido à nitrificação ou desnitrificação das populações bacterianas metabolicamente ativas existente neste compartimento lacustre. Embora não verificada a compartimentalização na lagoa Juparanã, a mistura na coluna d’água torna-a um ambiente oxidativo, evitando a ocorrência de processos redutores, o que justifica as baixas concentrações de N-NH⁴ comparadas com as de N-NO²⁻. Esteves e Amado (2011) citam que apesar da grande importância do N-NO²⁻ como precursor de diversos processos de transformação do nitrogênio em ecossistemas lacustres, sua concentração em ecossistemas naturais é geralmente baixa, uma vez que é rapidamente consumido pelos processos de nitrificação e desnitrificação. Segundo Frazen (2009), o ciclo do nitrogênio é controlado por processos microbiológicos onde o oxigênio exerce relevante influência, pois a presença de oxigênio determina as taxas de nitrificação, o que possivelmente aconteceu na lagoa Juparanã, devido aos valores registrados para a concentração de N-NO²⁻, e a desnitrificação ocorre somente em condições anóxicas ou de reduzida concentração de oxigênio dissolvido, característica não verificada ao longo do período estudado na lagoa Juparanã.

Com relação ao fósforo, o ciclo deste elemento se encontra intimamente relacionado

às condições de circulação lacustre, pois durante a circulação e adição de oxigênio nas regiões profundas e anóxicas do fundo lacustre, o ferro será oxidado, resultando na diminuição do fosfato inorgânico dissolvido disponível na coluna d’água, seja pela adsorção ou pela precipitação do fosfato férrico (ESTEVES, 1998; OVERBECK, 2000; FRAZEN, 2009). A principal consequência da precipitação do fosfato inorgânico dissolvido é a sua exclusão definitiva ou temporária de circulação. Sua liberação para coluna d’água acontece em condições de reduzidas concentrações de oxigênio dissolvido e, sobretudo, em anaerobiose (ESTEVES, 1998), condições que não ocorreram na lagoa Juparanã e que podem justificar os reduzidos valores registrados, associados ao fato da incorporação pelo fitoplâncton, por se tratar da forma inorgânica fosfatada preferencialmente assimilável pela comunidade.

Durante o período estudado não foram registrados, na lagoa Juparanã, valores de P-PO₄³⁻ abaixo do limite de detecção do método (3,1 µg.L⁻¹) e o valor máximo registrado foi de 43,5 µg.L⁻¹. Os valores registrados neste ecossistema por Bozelli et al. (1992) variaram de < 1 µg.L⁻¹ a 10,5 µg.L⁻¹. Em Huszar et al. (1994) estiveram abaixo 5 µg.L⁻¹ e em 82% das amostragens realizadas por Gonçalves (2005) abaixo de 25 µg.L⁻¹. Quanto ao P-total, neste estudo, os valores registrados são baixos, porém a variação observada (30,8 µg.L⁻¹ a 150,9 µg.L⁻¹) pode ser considerada elevada comparada aos resultados obtidos por Huszar et al. (1994) e Gonçalves (2005).

A condutividade elétrica apresentou maiores médias no inverno comparado ao verão nas quatro estações amostrais. Foi observada homogeneidade desta variável ao longo da coluna d’água em todas as estações,

porém com tendência de aumento nos valores ao longo das amostragens no verão, assim como no inverno. Esta variável foi apontada como uma das variáveis descritoras da variabilidade ocorrida no ecossistema, em função da sazonalidade apresentada, evidenciada pela análise estatística. Possivelmente, isto está associado ao transporte de íons dos afluentes lacustres. Como no verão a pluviosidade é maior, esta modifica o fator de diluição da água, justificando os reduzidos valores comparados com o inverno. Como a lagoa é um ecossistema misturado não foram observadas estratificações na condutividade elétrica. Os valores registrados, inclusive o mais elevado durante todo o período amostral ($151 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), não apontam condições de eutrofização, conforme citam os trabalhos de Watanabe (1981) e Calijuri e Tundisi (1990). Isto se deve ao fato de que os íons mais diretamente responsáveis pelos dados da condutividade elétrica são os macronutrientes (como cálcio, magnésio, potássio, sódio, carbonato, sulfato e cloreto). De acordo com Egborge (1979), alterações relevantes nos valores da condutividade elétrica não são esperadas para ecossistemas de água doce, a menos que recebam consideráveis cargas de efluentes domésticos e, neste caso, apenas o íon amônio pode ter influência na condutividade elétrica, desde que em altas concentrações, o que não foi registrado na lagoa Juparanã. Comparado a outros estudos desenvolvidos neste ecossistema, esta pesquisa registrou o maior valor de condutividade elétrica (variação de $66 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a $151 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), pois em Bozelli et al. (1992) a variação da condutividade elétrica foi de 95 a $104 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, em Huszar et al. (1994) de 12 a $105 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e em Gonçalves (2005) de 79,2 a $92,2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Em regiões tropicais, os valores da condutividade elétrica em ecossistemas aquáticos estão

mais relacionados com as características geoquímicas da região onde se localizam os corpos d'água e com a sazonalidade (períodos secos e chuvosos), mas podem também ser influenciados pelo estado trófico, principalmente em ambientes sob influência antrópica (ESTEVEVES et al., 2011).

A condutividade elétrica também pode ser influenciada pelo pH do meio, sendo que em águas com reduzidas concentrações de sais solúveis o pH é baixo (< 5) e o íon H^+ torna-se o principal responsável pela condutividade elétrica, papel atribuído ao íon OH^- em condições de alcalinidade ($\text{pH} > 9$) (ESTEVEVES et al., 2011). Ao longo do estudo, a salinidade da lagoa Juparanã foi zero, caracterizando-a como um ecossistema de águas doces, uma vez que é um ecossistema isolado da influência marinha. O pH médio das quatro estações amostrais caracterizou as águas da lagoa como levemente alcalinas (Tabela 1). Nesta situação a posição de equilíbrio ácido-base das águas naturais é determinada pelo nível de H^+ ou OH^- do processo dominante. O ácido carbônico (H_2CO_3), dissociado na forma de bicarbonato (HCO_3^-) é, geralmente, responsável por manter o pH da água em torno da neutralidade (FRAZEN, 2009). Na lagoa Juparanã a variação do pH durante o período estudado (5 a 9) não está associada somente aos fatores geoquímicos da bacia hidrográfica pelos quais os complexos carbonatos-bicarbonatos poderiam interferir, mas pelos transportes de materiais provenientes dos processos de decomposição dos afluentes de entorno, dos ecossistemas terrestres adjacentes carregados por escoamento superficial, do equilíbrio atmosfera-água que regula essencialmente a concentração de CO_2 e do próprio metabolismo lacustre, como florações fitoplanctônicas.

Além da interferência nas variáveis químicas, as variáveis meteorológicas afetam na qualidade óptica da água. Devido aos ventos constantes, o ecossistema lacustre é sempre misturado e continuamente turvo, em função das partículas removidas do fundo pela ação de ondas. Variabilidade horizontal é, portanto, mais relevante que a estratificação vertical que ocorre ocasionalmente (LOPARDO, 2002). A transparência da água na lagoa Juparanã foi maior durante o inverno, comparado com o verão, em todas as estações amostrais, o que fez com que a diferença entre os valores nestes dois períodos fosse significativa. As estações 3 e 4 são mais rasas, resultando em igualdade da profundidade da zona eufótica e fundo da estação 3 e se aproximando da mesma condição na estação 4, durante o inverno. Os reduzidos valores da transparência da água e a profundidade da zona eufótica (z_{eu}) são explicados pela circulação promovida pelo vento, assim como os elevados valores de turbidez, maiores no verão, comparado com o inverno, nas quatro estações amostrais, e material particulado em suspensão (MPS), que apresentou variação sazonal semelhante à turbidez, sendo a diferença entre os valores registrados para as duas variáveis, estatisticamente significativa apenas para os períodos amostrais e não entre estações e profundidades. Segundo Figueiredo (2007), a pluviosidade modifica o fator de diluição da água, devido à elevação do volume fluvial, pois aumenta o transporte de materiais da bacia de drenagem para o interior desses corpos d'água com o aumento do escoamento superficial na bacia, sejam esses materiais de origem orgânica ou inorgânica, natural ou antrópica. Isto foi observado na lagoa Juparanã, através dos menores valores da transparência e profundidade da zona eufótica no verão e maiores valores da turbidez e MPS associado

ao maior volume de chuvas e condição oposta no inverno quando o volume das mesmas é menor. Segundo Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008), a profundidade da z_{eu} pode variar diariamente, por estação amostral ou por eventos meteorológicos importantes como períodos de estabilidade e circulação da coluna d'água, sendo este último relevante para as variações registradas na lagoa Juparanã. Resultados semelhantes ao observado neste estudo, com redução da transparência da água no verão (período chuvoso) foram observados por Huszar et al. (1990) e Bozelli et al. (1992) neste mesmo ecossistema.

O Índice de Estado Trófico (IET) médio classificou a lagoa Juparanã, no verão, como mesotrófica com tendência à eutrofização e, no inverno, como mesotrófica, sendo a diferença entre ambos os períodos estatisticamente significativamente, o que não se observa entre as estações amostrais.

A concentração de clorofila *a* da lagoa Juparanã, ao longo do período estudado ($0,5 \mu\text{g.L}^{-1}$ a $57,6 \mu\text{g.L}^{-1}$), foi considerada baixa comparada a estudos em outras lagoas costeiras (BECKER, 2002; NUNES, 2003; SOUZA, 2007; PASSERINI, 2010). Porém, comparado a pesquisas pretéritas realizadas na lagoa Juparanã (BOZELLI et al., 1992; GONÇALVES, 2005) estes foram os maiores valores registrados para este ecossistema, sendo esta evolução também observada para as concentrações de fósforo, embora não tenham sido observadas correlações entre as concentrações de clorofila *a* e fósforo. A inexistência de correlação entre estas duas variáveis observada nesta pesquisa é atribuída à predominância de cianobactérias na comunidade fitoplanctônica, cujo pigmento predominante é a ficocianina em detrimento da clorofila, independente do tipo. Durante o verão, houve limitação da comunidade

fitoplanctônica por luz devido à condição de circulação que resultou na elevação da turbidez, mas a maior concentração de clorofila *a* no verão, comparada ao inverno, está associada à tolerância à limitação por luz e ao aproveitamento da disponibilidade de nutrientes, típica das cianobactérias, predominantes neste período, em função do efeito provocado pela pluviosidade e pelo vento na dinâmica física do ecossistema, o que justifica a classificação da lagoa como mesotrófica com tendência à eutrófica. No inverno, a turbidez foi menor, a transparência da água e a profundidade da z_{eu} maiores e a disponibilidade de nutrientes menor, favorecendo outros grupos fitoplanctônicos, com as desmídias. Mesmo com biovolume maior que o das cianobactérias, como as desmídias foram numericamente menos representativas a concentração de clorofila *a* neste período foi menor. O surgimento das desmídias foi atribuído à redução da concentração de nutrientes, em especial o fósforo, ao qual estas algas são intolerantes. Isto justifica a classificação da lagoa Juparanã no inverno como mesotrófica.

Assim, o estado trófico da lagoa Juparanã está associado ao padrão de circulação do ecossistema, em função da sazonalidade térmica, sendo este um fator relevante na avaliação do grau de trofia da lagoa Juparanã, visando subsidiar o gerenciamento lacustre. Os resultados da caracterização limnológica mostraram que o conhecimento do padrão de circulação das lagoas costeiras, avaliando-se como caso a lagoa Juparanã, é fundamental na compreensão de outros mecanismos lacustres, como a variação da concentração e disponibilidade de nutrientes, biomassa fitoplanctônica, disponibilidade de luz, que, por sua vez, integram IET e que estão

diretamente relacionados aos múltiplos usos da água como recurso natural.

Uso e Ocupação da terra

A bacia hidrográfica da lagoa Juparanã, com 2.310,13 km², abrange 15 distritos em 11 municípios do Espírito Santo. O entorno da lagoa Juparanã possui 55 subbacias, sendo 31 localizadas na margem esquerda (LM) e 24 na margem direita (RM). Com relação às classes de uso da terra, no entorno da lagoa Juparanã observou-se predomínio de pastagem seguido, respectivamente, por floresta natural e agricultura. Estes usos foram agrupados em compartimentos da paisagem com predomínio dos sistemas seminaturais, representados por agroecossistemas. Os sistemas naturais, representados por florestas naturais e lagoas, constituem a segunda classe de compartimentação da paisagem. Os sistemas urbano-industriais são pouco representativos. (Figura 2).

A lagoa Juparanã apresenta a maior área de espelho d'água (62,06 km²) e bacia de drenagem da região do Baixo Rio Doce (BARROSO; MELLO, 2013), assim como o maior número de barragens em sua bacia (109), o que indica um fluxo hidrológico regulado, principalmente nos períodos de seca, além de alterações dos fluxos d'água, sedimentos, nutrientes e matéria orgânica devido à fragmentação fluvial. O fator de envolvimento da lagoa Juparanã (37,23) pode ser considerado baixo, comparado a outros ecossistemas lacustres, como a lagoa do Nado (49,74) (BEZERRA-NETO; PINTO-COELHO, 2002) e a lagoa da Pampulha (53) (RESK, BEZERRA-NETO, PINTO COELHO, 2007). Porém, um dos mais altos entre as lagoas da região do Baixo Rio Doce, abaixo apenas da lagoa Durão

(59,86), conforme Barroso e Mello (2013), o que indica que este ecossistema apresenta a menor capacidade de diluição diante do material transportado pela bacia hidrográfica nesta região, comparado às demais lagoas da região do Baixo Rio Doce.

Este material transportado refere-se não somente às partículas sólidas em suspensão como também substâncias dissolvidas, como os nutrientes que caracterizam o grau trófico do ecossistema aquático, além das contribuições de organismos fitoplanctônicos de outros ecossistemas, como as cianobactérias. A concentração de nutrientes está relacionada à produtividade dos ecossistemas aquáticos e, portanto, com o processo de eutrofização, que ocorre naturalmente em função da idade do ecossistema ou artificialmente induzida por impactos antrópicos que afetam a qualidade da água (CUNHA et al., 2010). Dentre estes, Xavier (2005), avaliando o efeito do uso e ocupação da terra em um ecossistema aquático tropical, cita que o fósforo proveniente do escoamento superficial de solo com atividade agrícola é incorporado ao sedimento lacustre e posteriormente disponibilizado para os produtores aquáticos, dentre eles o fitoplâncton.

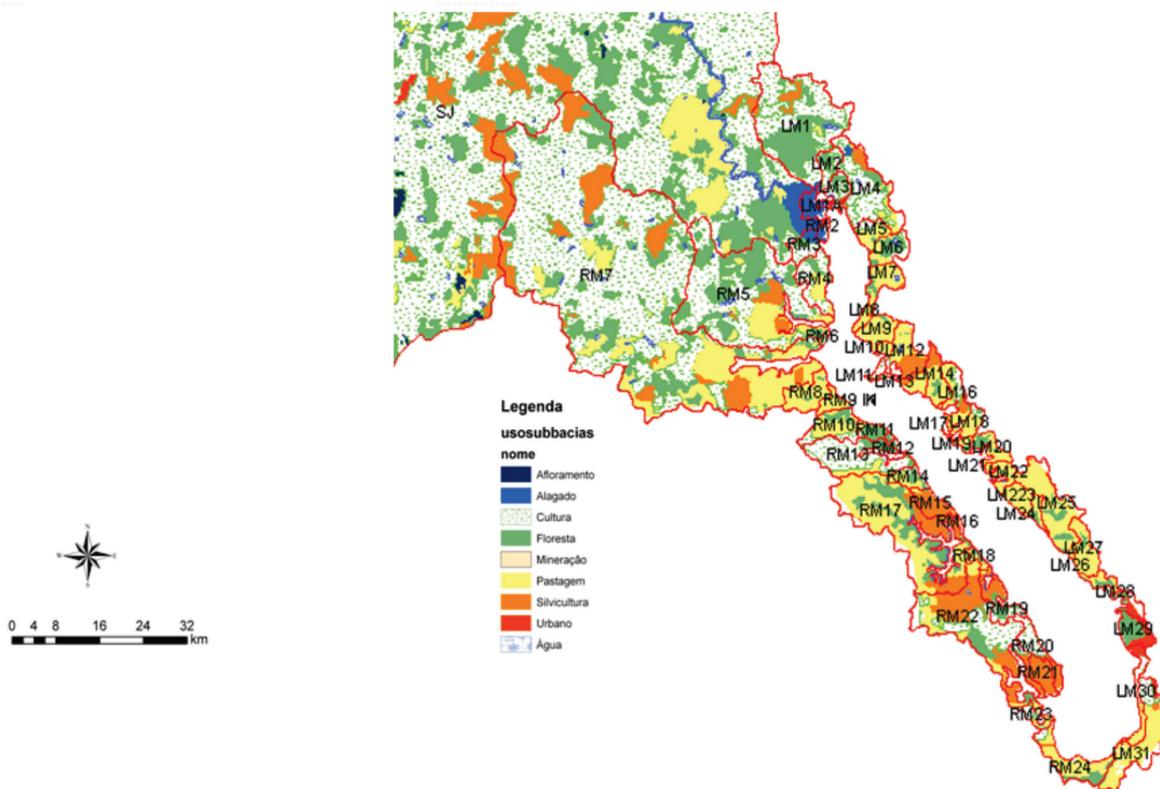
A agricultura é a classe de uso da terra predominante na bacia hidrográfica da lagoa Juparanã e na área de entorno dos córregos, o que contribui para incremento das concentrações de fósforo na lagoa Juparanã, porém como este ecossistema apresenta elevadas concentrações de oxigênio dissolvido isto faz com que as concentrações de fósforo disponíveis na coluna d'água não sejam elevadas. No entanto, as concentrações deste nutriente obtidas nesta pesquisa foram as maiores registradas até o momento, comparadas

a outros estudos realizados neste ecossistema (BOZELLI et al., 1992; HUSZAR et al., 1994; GONÇALVES, 2005).

Com relação à pastagem, o predomínio como classe de uso da terra no entorno da lagoa faz com que o solo adjacente fique exposto e, dessa forma, por meio do escoamento superficial, as concentrações de nutrientes no meio aquático possam se elevar. Comparado à agricultura, deve-se considerar que o meio pelo qual os nutrientes chegam ao ecossistema lacustre seja semelhante: via escoamento superficial, embora o incremento nutricional pela agricultura possivelmente possa ser maior, devido ao uso de fertilizantes. Na avaliação realizada por Bozelli et al. em 1992 observa-se que a lagoa Juparanã apresentava margens com reduzidos fragmentos florestais conservados e pouca ocupação humana, porém grande parte ocupada por atividade agropecuária. Avaliando-se comparativamente a evolução das condições ambientais da lagoa, verifica-se que o padrão de uso e ocupação da terra manteve-se, mas, provavelmente em proporções distintas.

Porém, as consequências do escoamento superficial não estão restritas à disponibilidade de nutrientes. O carreamento de partículas sólidas em suspensão pode afetar a penetração de luz no meio aquático e reduzir a transparência, interferindo no metabolismo das comunidades produtoras. Isto pôde ser observado na lagoa Juparanã, pois a transparência da água foi reduzida, assim como o limite da zona eufótica, devido à circulação existente na coluna d'água que promove a ressuspensão dos sedimentos lacustres e das partículas alóctones, reduzindo a transparência da água, além de promover a disponibilidade dos nutrientes inorgânicos

Figura 2 - Mapa de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica da lagoa Juparanã (ES) e delineamento das 55 subbacias no entorno da mesma. LM (subbacias da margem esquerda da lagoa Juparanã). RM (subbacias da margem direita da lagoa Juparanã).



Fonte: Martins, F. C. O. (2015).

dissolvidos ao fitoplâncton, resultando no desenvolvimento de algas tolerantes a estas condições, como as cianobactérias.

Mesmo com contribuições reduzidas, a urbanização apresenta relevante significado em impactos antrópicos, principalmente considerando a subbacia no entorno da lagoa Juparanã em que este tipo de uso predomina, caracterizando a paisagem desta como um sistema urbano-industrial. Por gerar impactos relevantes que se estendem por todo corpo hídrico, mesmo com baixa contribuição no uso da terra da bacia hidrográfica, a urbanização não deve ser negligenciada.

Aplicação do modelo DPSIR

Na lagoa Juparanã, os resultados mostraram que as interferências antrópicas estão associadas ao uso e ocupação da terra e do próprio recurso hídrico, como a piscicultura. A interferência político-governamental está relacionada às barragens distribuídas na bacia de drenagem da lagoa Juparanã que alteram os fluxos hidrológicos. A interferência natural está associada à pluviosidade com potencialidade de provocar enchentes, agravada pela região de planície onde se insere a lagoa.

Segundo Braga e Ferreira (2011), ações da natureza podem gerar impactos no ambiente e interferir com fonte de pressão, como a pluviosidade para a lagoa Juparanã, ou seja, a pluviosidade não se configurou como pressão, mas é um fator natural que acentuou as pressões no ecossistema, conforme mostraram os resultados, em função do escoamento superficial. Dessa forma, a compreensão da dinâmica física da lagoa Juparanã, até então ainda não avaliada para este ecossistema, contribuiu para apontar que indicadores limnológicos refletiriam o estado da lagoa, o que mostra a importância da abordagem limnológica nos estudos de avaliação ambiental integrada de bacias hidrográficas como ferramenta de monitoramento.

O estado deste ecossistema é caracterizado por tendências negativas, principalmente com relação ao fitoplâncton, verificado através da biomassa fotossintética e aumento na concentração de nutrientes, comparada a estudos anteriores (BOZELLI et al., 1992; HUSZAR et al., 1994; GONÇALVES, 2005), associado ao aumento das atividades econômicas na bacia e seus potenciais impactos negativos.

Neste sentido, a proposição das zonas de tamponamento, através da conservação de sistemas naturais, atuaria como resposta (R) à pressão (P) das enchentes apontadas no modelo DPSIR aplicado à lagoa Juparanã, pois segundo Tucci (1995; 1997), os principais tipos de enchentes em áreas urbanas são devido à pavimentação (produzidas pela impermeabilização do solo e aumento da capacidade de escoamento por meio de dutos e canais), à ocupação das áreas ribeirinhas (enchentes naturais que ocorrem em bacias grandes – maiores que 1.000 km²) e aos problemas localizados, como obstruções

ao escoamento e projetos inadequados, os quais podem ocorrer combinados ou separadamente em diferentes partes da bacia hidrográfica.

O controle de enchentes em áreas ribeirinhas, tipo predominante na bacia hidrográfica da lagoa Juparanã, pode ser realizado por medidas estruturais ou não estruturais de acordo com os custos envolvidos (TUCCI, 1993). No Plano Diretor de Drenagem é dada ênfase ao controle através de medidas não-estruturais, caracterizada pelo zoneamento de áreas de inundação. Nesse zoneamento são especificados os critérios de ocupação do leito maior dos rios da bacia hidrográfica que, no caso da lagoa Juparanã, corresponderiam a critérios de ocupação de suas margens com base no estabelecimento de uma zona de ocupação, a partir da delimitação das subbacias no entorno da lagoa. O controle de enchentes deve ser estabelecido através do Plano Diretor de Drenagem Urbana e administrado pelos municípios com o apoio técnico do Estado (TUCCI, 1997), configurando uma gestão pública consorciada, necessária à lagoa Juparanã que, geograficamente, abrange três municípios do Espírito Santo (Linhares, Sooretama e Rio Bananal), sendo que as 55 subbacias delimitadas estão distribuídas entre os mesmos.

O Índice de Estado Trófico (IET) é uma variável limnológica ecológica que reflete a de incremento nutricional pela atividade da piscicultura, pois considera variáveis abióticas, como a concentração de fósforo e a transparência da água, e bióticas, com a biomassa fitoplanctônica. Diante da pressão causada pela piscicultura como uso dos recursos hídricos, a determinação da capacidade de suporte lacustre pode

Quadro 2 - Classificação dos indicadores ambientais da lagoa Juparanã segundo o modelo DPSIR

(continua)

D (Indutores)	P (Pressões)	S (Estado)	I (Impacto)	R (Resposta)
-Agricultura -Silvicultura	<ul style="list-style-type: none"> - Desmatamento; - Exposição do solo; -Uso de fertilizantes; -Uso de agrotóxicos; -Uso desordenado de água 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento na concentração de nutrientes; - Aumento de contaminantes; - Redução da transparência da água; - Redução da biodiversidade aquática; 		<ul style="list-style-type: none"> - Recomposição vegetal; - Cumprimento da legislação ambiental; - Aproveitamento de áreas já desmatadas; - Adoção de boas práticas agrícolas; - Políticas de conscientização ambiental;
Pastagem	<ul style="list-style-type: none"> - Desmatamento; - Exposição e erosão do solo; - Uso de herbicidas e agrotóxicos; - Fonte de matéria orgânica; 			<ul style="list-style-type: none"> - Inutilização do uso do ecossistema aquático; - Assoreamento - Contaminação - Desequilíbrio ecológico aquático; - Perda da qualidade cênica;
Piscicultura	<ul style="list-style-type: none"> - Eutrofização artificial; - Introdução de espécies exóticas; 	<ul style="list-style-type: none"> - Perda/redução da biodiversidade aquática; - Aumento na concentração de nutrientes; - Redução da transparência da água; 		

Quadro 2 - Classificação dos indicadores ambientais da lagoa Juparanã segundo o modelo DPSIR (conclusão)

Urbanização	<ul style="list-style-type: none"> - Recreação; - Consumo de água; - Eutrofização artificial; - Acidificação; - Barragens; - Enchentes; 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento na concentração de nutrientes; - Aumento de contaminantes; - Redução da transparência da água; - Redução da biodiversidade aquática; - Contaminação por efluentes industriais e domésticos; 	<ul style="list-style-type: none"> - Inutilização do uso; - Exposição a cianotoxinas; - Contaminação; - Desequilíbrio ecológico aquático; - Perda da qualidade cênica; - Risco de contração de doenças de veiculação hídrica 	<ul style="list-style-type: none"> - Cumprimento da legislação urbanística e ambiental; - Plano Diretor Urbano; - Evitar a expansão urbana em direção aos remanescentes florestais; - Criação de faixas de proteção marginal (<i>buffer zones</i>); - Programa de Saneamento Básico; - Políticas de conscientização ambiental; - Programa de contenção de enchentes.
-------------	---	---	--	---

Fonte: Martins, F. C. O. (2015).

ser apontada como resposta (R), na configuração do modelo DPSIR para a lagoa Juparanã.

Neste sentido, a *Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO* (IOC) elencou, através do manual para medida do progresso e consequências do gerenciamento costeiro e marinho integrado, os indicadores para o monitoramento efetivo e avaliação, amplamente reconhecidos como ferramentas indispensáveis nos projetos e programas de planejamento e gerenciamento de áreas costeiras, os quais envolvem indicadores da dimensão ecológica (incluindo os ecossistêmicos), enfatizados nesta pesquisa, assim como sua interação com indicadores de outras dimensões (social, econômica e institucional), configurando um conjunto de indicadores de estado (S) dentro do modelo DPSIR (Quadro 2).

Dentre os indicadores ecológicos apontados pelo manual e analisados nesta pesquisa com o objetivo de avaliar a manutenção da qualidade da água tendo como meta a conservação das propriedades físicas, químicas e geológicas do ecossistema foram considerados a concentração de nutrientes, medida de biomassa fitoplancônica e transparência da água, integrados no índice de estado trófico, que são influenciados pela dinâmica lacustre e padrão de uso da terra.

Conclusões

Os resultados desta pesquisa mostraram que a caracterização limnológica proporciona bases para um monitoramento aquático, fundamental no acompanhamento da evolução do uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica e nos

planos de ação e gestão de recursos lacustres. A partir da caracterização limnológica da lagoa Juparanã foi possível a compreensão de sua dinâmica, influenciada pela sazonalidade em detrimento à ausência de variações espaciais, que influenciou, por exemplo, na variação do IET, indicador relevante e funcional para subsidiar o manejo lacustre. Entretanto, a conservação dos recursos bióticos não ocorre sem a participação do homem e este não pode utilizá-los em níveis sustentáveis de exploração sem o conhecimento dos componentes e processos ecológicos dos sistemas naturais, que para a bacia hidrográfica avaliada foram representados pelas informações sobre a dinâmica lacustre associada ao uso e ocupação da terra. Portanto, a gestão integrada de todos

os componentes da bacia hidrográfica, utilizando os indicadores limnológicos como ferramenta, pode apontar medidas mitigadoras e respostas às atividades antrópicas que afetam diretamente os recursos hídricos, sendo de fundamental importância para a tomada de decisão, conforme proposição do modelo DPSIR.

Agradecimentos

À FAPES pela bolsa de doutorado concedida à autora. Ao Professor Gilberto Fonseca Barroso pelo auxílio na realização da pesquisa e ao Laboratório de Limnologia e Planejamento do Departamento de Ecologia e Oceanografia da Universidade Federal do Espírito Santo pelo suporte logístico no desenvolvimento deste estudo.

Referências

- APRILE, F. M.; LORANDI, R.; BIANCHINI JÚNIOR, I. A dinâmica costeira e os processos na foz do rio Doce, Espírito Santo – Brasil. **Bioikos**, v.18, n.1, p. 71 – 78, 2004.
- BARROSO, G. F. Lagoas costeiras do Espírito Santo: perspectivas para conservação. In: MENEZES, L. F. T.; PEREIRA, O. (Ed.). **Ecosistemas costeiros do Espírito Santo: conservação e restauração**. Vitória: Edufes, 2007. 71 – 86 p.
- BARROSO, G. F.; LITTLEPAGE, J. **Protocolo para análise de clorofila *a* e feopigmentos pelo método fluorimétrico**. Victoria, Brazilian Program of Mariculture – BMLP, University of Victoria, 1998.
- BARROSO, G. F.; MELLO, F. A. de O. Compartimentação da paisagem e indicadores de pressões ambientais em ecossistemas lacustres e fluviais na região do Baixo Rio Doce (ES). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA: Uso e ocupação da terra e as mudanças das paisagens. 15., 2013, Vitória. **Anais...** Vitória: UFES, 2013. p. 156 – 165. 1-CD-ROM.
- BECKER, V. **Variação da estrutura e da biomassa fitoplanctônica na Lagoa Itapeva (litoral norte do Rio Grande do Sul) em função da hidrodinâmica**. 2002. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

- BEU, S. E. **Análise socioambiental do complexo estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape e Ilha Comprida (SP):** subsídios para o planejamento ambiental da região. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BEZERRA-NETO, J. F.; PINTO-COELHO, R. M. A morfometria e o estado trófico de um reservatório urbano: lagoa do Nado, Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais. **Acta Scientiarum**, v.24, n.2, p. 285 – 290, 2002.
- BORJA, A.; GALPARSORO .I.; SOLAUN, O.; MUXIKA, I.; TELLO, E. M.; URIARTE, A.; VALENCIA, V. The European Water Framework Directive and the DPSIR, a methodological approach to assess the risk of failing to achieve good ecological status. **Estuarine, Coastal Shelf Science**, v.66, n.1-2, p. 84–96, 2006.
- BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F.; SUZUKI, M. S. Padrões de funcionamento das lagoas do baixo rio Doce: variáveis abióticas e clorofila a (Espírito Santo – Brasil). **Acta Limnológica Brasiliensia**, ano IV, p.13–31, 1992.
- BRAGA, P. M.; FERREIRA, C. N. Propostas de indicadores ambientais na gestão de recursos hídricos na comunidade de Ponta Grossa dos Fidalgos, Lagoa Feia–RJ: utilização do Modelo Força Motriz/Pressão–Situação–Impacto–Resposta. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, n.5, v.2, [s.p.], 2011.
- CALIJURI, M. C.; TUNDISI, J. G. Limnologia comparada das represas do Lobo (Broa) e Barra Bonita - Estado de São Paulo: mecanismos de funcionamento e bases para o gerenciamento. **Revista Brasileira de Biologia**, v.50, n.4, p. 893–913, 1990.
- CARMOUZE, J. P. **O metabolismo dos ecossistemas aquáticos.** Fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas. São Paulo: Edgard Blücher/FAPESP, 1994. 253 p.
- CLARK, J. R. (Ed.). **Coastal zone management: handbook.** Boca Raton: CRC Press, 1996.
- COLE, G. **Textbook of limnology.** Saint Louis: CV Mosby, 1994. 283 p.
- CUNHA, D. G. F.; BOTTINO, F.; CALIJURI M, do C. Land use influence on eutrophication-related water variables: case study of tropical Rivers with different degrees of anthropogenic interference. **Acta Limnológica Brasiliensia**, v.22, n.1, p. 35–45, 2010.
- EGBORGE, A. B. M. Observations on the diurnal changes in some physicochemical variables of Lake Asejire – a new impoundment in Nigéria. **Polskie. Archwm. Hydrobiol.**, v.26, n.3, p. 301–311, 1979.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia.** 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602 p.
- ESTEVES, F. A.; AMADO, A. M. Nitrogênio. In: ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia.** 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 239 – 258.

ESTEVEES, F. A.; FIGUEIREDO-BARROS, M. P.; PETRUCIO, M. M. Principais cátions e ânions. In: ESTEVEES, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 299 – 321.

ESTEVEES, F.A.; FURTADO, A. L. S. Oxigênio dissolvido. In: ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 167–191.

FIDALGO, E. C. C. **Critérios para a análise de métodos e indicadores ambientais usados na etapa de diagnóstico de planejamentos ambientais**. 2003. 276 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FIGUEIREDO, D. M. **Padrões limnológicos e do fitoplâncton nas fases de enchimento e de estabilização dos reservatórios do APM Manso e AHE Jauru (Estado de Mato Grosso)**. 2007. 285 f. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

FRANZEN, M. **Dinâmica do fósforo na interface água-sedimento em reservatórios**. 2009. 244 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2009.

GONÇALVES, M. A. **Ecofisiologia de algas fitoplanctônicas a lagoa Juparanã (Linhares – ES): variação espacial, temporal e bioindicadores do estado trófico**. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória, 2005.

HATUSHIKA, R. S.; SILVA, C.G.; MELLO, Sismoestratigrafia de alta resolução no lago Juparanã, Linhares (ES-Brasil) como base para estudos sobre sedimentação e tectônica Quaternária. **Revista Brasileira de Geofísica**, n.25, n.4, p. 433-442, 2007.

HORT, A. **Aplicação de indicadores de desenvolvimento sustentável–estudo de caso: avaliação do impacto antropogênico na zona costeira do estado de Santa Catarina, Brasil**. 2008. 199 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, 2008.

HUSZAR, V. L. M.; SILVA, L. H. S.; ESTEVEES, F. A. Estrutura das comunidades fitoplanctônicas de 18 lagoas da região do baixo rio Doce, Linhares, Espírito Santo. Brasil. **Revista Brasileira de Biologia**, v.50, n.3, p. 585–598, 1994.

HUSZAR, V.L.M.; WERNECK, A. M.; ESTEVEES, F. A. Dinâmica nictemeral (48h) da comunidade fitoplanctônica em relação aos principais fatores abióticos na lagoa Juparanã, Linhares, Espírito Santo, Brasil: fevereiro de 1987. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 54, n. 1, p. 111–134, 1994.

JORGENSEN, S. E.; VOLLENWEIDER, R. A. (Ed.). **Princípios para o gerenciamento de lagos**. São Carlos: ILEC, 2000. 202 p.

LAURA, A.A. **Um método de modelagem de um sistema de indicadores de sustentabilidade para gestão dos recursos hídricos – MISGERH: o caso da bacia dos Sinos**. 2004. 519 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LELLIS, F. S. **Aplicação da abordagem DPSIR como estrutura para avaliação integrada da eutrofização e da qualidade da água das lagoas Jacuném e Juara, bacia do Rio Jacaraípe (Serra-ES). 2010.** [s.f.]. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

LEWIS, W. M. Jr. Tropical limnology. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.18, p. 159-184, 1987.

LIN, T.; XUE, X. Z.; LU, C. Y. Analysis of coastal wetland changes using the “DPSIR” model: a case study in Xiamen, China. **Coastal management**, v. 35, n.2-3, p. 289-303, 2007.

LOPARDO, N. **Estudo hidrodinâmico e correlação com sólidos suspensos e turbidez na lagoa Itapeva do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul.** 2002. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

NUNES, T.S. **Caracterização especial e temporal da comunidade fitoplanctônica de uma lagoa costeira da região norte fluminense: lagoa do Açú, Campos dos Goytacazes – São João da Barra – RJ.** 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2003.

ODUM, E. P.; ODUM, H. T. Natural areas as necessary components of man's total environment. **Transactions of the North American Wildlife and Natural Resources Conference**, v. 37, p. 178-189, 1972.

ODUM, E. P. **Ecologia.** Rio de Janeiro: Interamericana, 1983.

OECD. Organization for Economic Cooperation and Development. In: _____. **Environmental Indicators.** Paris: OECD, 1994. p. 124-176.

OVERBECK, J. Avaliação qualitativa e quantitativa do problema. In: JORGENSEN, S. E.; VOLLENWEIDER, R. A. (Ed.). **Princípios para o gerenciamento de lagos.** São Carlos: ILEC, 2000. p. 33-42.

PASSERINI, M. D. **Influência das frentes frias nos mecanismos de funcionamento da represa da UHE Carlos Botelho (Lobo/Broa) – Itirapina – SP, dos pontos de vista químico, físico e biológico.** 2010. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos, 2010.

PIRRONE, N.; TROMBINO, G.; CINNIRELLA, S.; ALGIERI, A.; BENDORICCHIO, G.; PALMERI, L. The Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) approach for integrated catchment coastal zone management: preliminary application to the Po catchment-Adriatic Sea coastal zone system. **Reg Environ Change**, v.5, p. 111-137, 2005.

RESCK, R. P.; BEZERRA NETO, J. F.; PINTO-COELHO, R. M. 2007. Nova batimetria e avaliação de parâmetros morfométricos da Lagoa da Pampulha (Belo Horizonte, Brasil). **Geografias**, v.3, n.2, p. 24-37, 2007.

SCHAEFFER, A. **Fundamentos de ecologia e biogeografia das águas continentais**. Porto Alegre: Editora da Universidade - UFRGS, 1985. 532 p.

SMEETS, E.; WETERINGS, R. **Environmental indicators: typology and overview**. European Environment Agency, Copenhagen. Report N^o. 25, 1999. 19 p.

SOUZA, B. D. A. **Estrutura, dinâmica e produtividade primária do fitoplâncton como base para estimativa do estado trófico de uma lagoa costeira no estado do Espírito Santo (lagoa Mãe-Bá, Guarapari)**. 2007. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2007.

STECH, J.; LORENZZETTI J. A. The response of south Brazil bright to the passage of wintertime cold fronts. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n.6, p. 9507 – 9520, 1992.

STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. A manual of sea water analysis. **Bulletin Fisheries Research Board of Canada**, v.125, p. 1–18, 1960.

SUGUIO, K.; Martin, L.; DOMINGUEZ, J. M. L. Evolução da planície costeira do rio Doce (ES) durante o quaternário: influência das flutuações do nível do mar. In: SUGUIO, K.; MEIS, M. R.; MOUSINHO de; TESSLER, M. G. (Ed.). **SIMPÓSIO DO QUATERNÁRIO NO BRASIL**, 4., 1982, Rio de Janeiro. **Atas...** Rio de Janeiro: CTCQ-SBG, 1982. p. 93-116.

TOLEDO JÚNIOR, A. P.; TALARICO, M.; CINHEZ, S. J.; AGUDO, E. G. A aplicação de modelos simplificados para avaliação de processos de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA**. 12., 1983, Camboriú. **Anais...** Camboriú, [S.I.], 1983. p. 1–34.

TUCCI, C. E. M. Controle de Enchentes. In: _____. **Hydrologia: ciência e aplicação**. São Paulo: Edusp, 1993.

TUCCI, C. E. M. Enchentes urbanas. In: _____. **Drenagem Urbana**. São Paulo: Edusp, 1995. cap. 1.

TUCCI, C. E. M. Plano Diretor de Drenagem Urbana: princípios e concepção. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.2, n.2, p. 5-12, 1997.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; ARANTES JUNIOR, J. D.; TUNDISI, J. E.; MANZINI, N. F.; DUCROT, R. The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical, and biological variables. **Brazilian Journal of Biology**. v.64, n.1, p. 177-186, 2004.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2008. 631 p.

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

WATANABE, T. **Flutuação sazonal e distribuição espacial do nano e microfitoplâncton na represa do Lobo (“Broa”), São Carlos, SP.** 1981. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos, 1981.

XAVIER C. F. **Avaliação da influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba, Paraná.** 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ZACHARIAS, I.; PARASIDOU, A.; BERGMEIER, E.; KEHAYIAS, G.; DIMITRIOU, E.; DIMOPOULOS, P. A “DPSIR” model for Mediterranean temporary ponds: European, national and local scale comparisons. **Annales de Limnologie-International Journal of Limnology**, v.44, n.4, p. 243–266, 2008.

ZAR J.H. 1999. **Bioestatistical analysis.** London: Prentice-Hall Inc., 1999. 629 p.