

7047
CRA 421/95-64
V.L

RELATÓRIO TÉCNICO CIENTÍFICO FINAL

Processo: **TEC 421/95**

Título: **Morfologia de lagos e reservatórios brasileiros**

Coordenador: **Eduardo von Sperling**
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Universidade Federal de Minas Gerais

21 JUN 1995 078856
FAPEMIG

1. Introdução

O projeto **Morfologia de Lagos e Reservatórios Brasileiros** foi desenvolvido em duas etapas. A primeira fase consistiu em um amplo levantamento sobre as características morfométricas de lagos e reservatórios brasileiros, realizado mediante consulta dirigida a 73 instituições (companhias de abastecimento de água, companhias energéticas, órgãos de controle ambiental, universidades, centros de pesquisa) responsáveis pelo gerenciamento e pesquisa de lagos e represas. Tais informações foram complementadas por meio de extensa coleta bibliográfica em livros e revistas especializados. Merece destaque o fato de tratar-se de iniciativa pioneira em nosso país, já que não se dispunha até então de nenhum acervo mais abrangente sobre a morfologia dos ambientes lênticos (lagos e represas) brasileiros. A relevância do tema foi reconhecida pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), que conferiu ao coordenador da pesquisa uma Bolsa de Produtividade em Pesquisa pelo período de dois anos com o objetivo de concretizar o projeto de pesquisa. Adicionalmente foi solicitado à FAPEMIG o fornecimento de um computador e impressora para compilação das informações recebidas e tratamento estatístico dos dados.

Em uma segunda etapa deu-se início à redação de um livro referente à **Morfologia de Lagos e Represas**, abordando-se não apenas os resultados da pesquisa mas também os aspectos conceituais e práticos relativos à origem de ambientes lacustres e à marcante influência exercida pela morfologia na qualidade dos ambientes aquáticos. Trata-se aqui da primeira obra em língua portuguesa sobre o referido tema. A redação do livro terminou em junho/98, sendo encaminhada na época uma correspondência à FAPEMIG informando que o relatório final, que na verdade coincide com o próprio livro, seria entregue em setembro/98. A necessidade de alterações em vários desenhos, a incorporação de novos dados recebidos além do prazo previsto e a ocorrência de dificuldades financeiras por parte do Fundo Editorial do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG provocaram um atraso de aproximadamente seis meses. No presente momento já existe a alocação financeira para a edição da obra, com recursos do mesmo Fundo Editorial referido anteriormente. Os originais do texto, tabelas e figuras já estão prontos, faltando tão somente a diagramação final e a incorporação de fotografias coloridas. O prazo mais provável para a finalização da impressão do livro é no decorrer do próximo mês de março, sendo que o autor assumiu o compromisso de fazer o seu lançamento formal por ocasião do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, a realizar-se no Rio de Janeiro no vindouro mês de março.

Em anexo é apresentada uma cópia dos originais, faltando tão somente a inclusão das fotos coloridas e a confecção de três figuras (n^{os} 55, 59, 63). Como todo o conteúdo do texto já está finalizado, incluindo-se a apresentação e

discussão dos resultados da pesquisa morfométrica, que foram o objeto do apoio da FAPEMIG, o coordenador apresenta esta obra como sendo o relatório final da pesquisa. Adicionalmente o autor compromete-se a enviar à FAPEMIG um exemplar do livro, tão logo esteja disponível, para que este faça parte dos acervos desta instituição.

2. Publicações técnicas decorrentes do projeto

São listadas a seguir, e também apresentadas em anexo, as publicações técnicas decorrentes do projeto de pesquisa.

- 1. Lake Management in tropic developing countries: the role of physical aspects.** Trabalho aceito para apresentação e publicação nos anais da 8. *International Conference on the Conservation and Management of Lakes*, a realizar-se em Copenhagen, maio/99
- 2. Morphometric features of Brazilian lakes and reservoirs.** Trabalho apresentado do *Kinneret Symposium on Limnology and Lake Management*, realizado em Ginossar, Israel (setembro/98) e aguardando publicação nos anais.
- 3. Restoration of tropical lakes: a trade-off between the need of ecological knowledge and the availability of financial resources.** Trabalho apresentado na *International Conference on Ecological Engineering*, Calcutta (novembro/98) e aguardando publicação nos anais.
- 4. The role of relative depth in the prediction of eutrophication of lakes and reservoirs.** Trabalho apresentado no 26. Congresso Internacional de Engenharia Sanitária e Ambiental, Lima (novembro/98), publicado em anais eletrônicos.
- 5. Profundidades médias de lagos e represas brasileiros e sua influência na qualidade da água.** Trabalho apresentado no 19. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (Foz do Iguaçu, setembro/97) e publicado nos anais.
- 6. The knowledge of morphological features of lakes and reservoirs as an efficient tool for the prediction of eutrophication.** Trabalho publicado nos anais da 7. *International Conference on the Conservation and Management of Lakes* (San Martín de los Andes, Argentina, setembro/97).

7. **Morfologia de lagos e represas: a importância do desenvolvimento do perímetro.** Trabalho apresentado no 6. *Congresso Brasileiro de Limnologia* (São Carlos, julho/97), com o resumo publicado nos anais.
8. **Morfologia de reservatórios no Estado de Minas Gerais, Brasil e sua relação com a qualidade da água.** Trabalho apresentado no 3. *Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa* (Maputo, Moçambique, maio/97) e publicado nos anais do evento.

Complementarmente será apresentado o trabalho (em preparação) **Morphology of Brazilian Lakes and Reservoirs** no *International Symposium on Reservoir Ecology* (Águas de São Pedro-SP, 25-29/01/99), na qualidade de palestra convidada.

O desenvolvimento da pesquisa co-financiada pela FAPEMIG motivou ainda a realização de um aprofundamento na análise da morfometria de ambientes lênticos, com a inclusão de um vasto acervo de dados internacionais. Este é o tema da dissertação de mestrado em curso da aluna Ana Paula Dantas (Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG), orientada por este coordenador.

3. Relatório final

V. Anexo

Belo Horizonte, 20 de janeiro de 1999



Eduardo von Sperling
Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Universidade Federal de Minas Gerais

LAKE MANAGEMENT IN TROPIC DEVELOPING COUNTRIES: *the role of physical aspects*

Eduardo von Sperling
Department of Sanitary and Environmental Engineering
Federal University of Minas Gerais
Av. Contorno 842/7 30110-060 Belo Horizonte Brazil
Fax: + 5531 2381879 E-mail: eduardo@desa.ufmg.br

Introduction

The tropic countries, referred as those situated in the warm belt of our planet, present some common features associated with geographical, climatological and also historical aspects. The water degradation problems in tropic countries assume a particular character due to the more intense metabolism observed in warm water aquatic communities. In this sense the response of the ecosystem is different from that found in temperate water bodies, mainly with respect to the development of eutrophication processes. Moreover the tropic countries generally present a poor infrastructure for research activities, together with a lack of specialized personnel and severe limitations in the availability of financial resources. Consequently the activities of lake management in tropic developing countries should be carried out according to the specific features pointed out here. One of the most important aspects related with lake management is a well founded knowledge about *structure* and *function* of the aquatic system. This information has a striking influence in the definition of the various steps of the lake management policy. Nevertheless the construction of this informative basis depends on the development of adequate monitoring programs, which are usually associated with high financial expenditures. This paper focuses on the concrete possibility of obtaining reliable informations about structure and function of the system by considering not only the complex relationships based on biological knowledge (food web, microbial loop, production and respiration) but also the **physical** aspects of the water body (morphology, hydrology, hydrodynamics, physical parameters). These are generally not sufficiently explored in comparison with the informations acquired via biological basis. The paper presents the author's experience in the research and management of Brazilian lakes, with emphasis given to the sound utilization of informations of physical nature.

Characteristics of tropical lakes and reservoirs

Tropical lakes, due to their geographical localization and the inherent climatic conditions, present some typical features, which can be summarized in the following points (von Sperling, 1996):

- a) The intense solar radiation and the high water temperature values accelerate nutrient uptake by the algae;
- b) The phytoplanktonic population peaks are less frequent in comparison with temperate aquatic environments;
- c) The high nutrient assimilation capacity, associated with high recycling rates lead to the prevalence of an intense degree of productivity;

- d) Nutrient concentrations are generally low; as a consequence many water bodies can be classified as oligotrophic in spite of their high productivity;
- e) There is a frequent occurrence of low phytoplankton densities, which are however associated with high growth rates;
- f) High mineralization rates lead to an accelerated oxygen depletion and to the formation of sediments that are poor in organic matter; consequently there is no direct connection between hypolimnetic oxygen deficit or content of organic matter in the sediment and the productivity of the water body.

Importance of physical aspects

The management of lakes and reservoirs has been all over the world strongly influenced by the results of monitoring programs carried out in order to obtain representative informations concerning the water quality of the lentic environment. Most of the data refers to the chemical and biological conditions of the water body, while the physical parameters, with exception of temperature and turbidity, are usually neglected. This is particularly true in the case of lakes situated in tropic developing countries, where the access to financial resources is quite limited. Here the most common choice is directed to a simplification of monitoring programs usually recommended in the technical literature and broadly adopted in temperate regions. As a consequence of this procedure some parameters of chemical and biological nature can be overevaluated, while the physical aspects of the water body, which frequently are the easiest to be obtained, are shifted to a lower level of priority. In the sequence some examples are presented related with valuable informations that can be extracted from a physical approach of the water body.

- Hydrology

The water cycle plays a striking role in the configuration of the quality of the aquatic environment. Alone the simple relationship between **precipitation and evaporation** (rarely found in limnological studies in tropical regions) can give precious informations regarding the dilution potential of the water body. The knowledge of the **water flow** in tributaries to the lake allows the calculations of the **load** of pollutants, nutrients etc, which is undoubtedly more informative than the mere determination of concentrations. This load is part of several mass balance models (e.g. Vollenweider, 1976) which enables the construction of distinct scenarios of water quality according to variations in the input of nutrients. For small rivers this measurement can be easily carried out with the use of appropriate and quite unexpensive equipments. It should be also stressed how neglected is the performance of the tributaries inside the framework of many limnological studies, which direct their focus exclusively to the water body characteristics. But maybe the most important hydrological factor for the lake management is the **water residence time**. Its value regulates the growth of aquatic communities (mainly phytoplankton), the availability of nutrients, the transport of pollutants and many other processes that take place inside the water body. In reservoirs the control of the water residence time, through the operation of deep discharge, can be used as an efficient technique for their restoration (Ryding and Rast, 1989).

The water residence time has also a striking influence on the quality of recreational waters in lakes, since systems with slow water movements are more susceptible to the effects of waste water discharges. This characteristic is intensified in tropical lakes, where the nutrient dynamics is far more accelerated, allowing hence the quick growth of aquatic organisms (algae and macrophytes) that can disturb the intended uses of the water environment. Long term experiments carried out by the author in the eutrophic **Pampulha Lake** (main touristic

attraction of the city of Belo Horizonte, Brazil; A: 2,6 km², Zmax: 16 m) show following mean values for the algae density:

Rainy season (november – april) *lower water residence time* 270,000 org. /l
 Dry season (may – october) *higher water residence time* 540,000 org. /l

- *Hydrodynamics*

The transport processes in lakes are responsible for the distribution of particulates, including microorganisms, and dissolved substances. Hence the **hydrodynamics** of the lake should be carefully analysed in order to get useful informations about the *distribution pattern* of the water body. A detailed research about all the transport processes that take place in the lake should include, besides the typical horizontal and vertical movements, also measurements in the surface, subsurface and benthic boundary layer (Imberger et. al., 1998) and the possible occurrence of Seiches, Ekman spirals, Langmuir currents. Nevertheless for the objective of lake management the simple determination of **vertical temperature profiles** at the deepest point can substantially contribute for a reasonable understanding of the circulation pattern of the water body. Without this information it becomes very difficult to develop a sound management of the lake, since the most important water uses (human and industrial supply, irrigation, energy generation, recreation) are strongly dependent on the water quality that results from the alternation of periods of stratification and circulation.

- *Morphology*

The **morphology** has a strong influence on nearly all physical, chemical and biological parameters of lakes and reservoirs (Wetzel, 1983). It is widely known that the **physical dimensions** (shape and size) of a lake interact with several climatic and surrounding edaphic factors to determine the characteristics of the water body as natural (in the case of lakes) or artificial (in the case of reservoirs) environments. In spite of the importance of morphology in defining the quality of the aquatic system its study is generally not carried out with an adequate level of importance. Some main parameters are surprisingly uncomplicated to be obtained, provided there is a minimum of basic informations from bathymetric maps. These informations can be used in order to evaluate the quality of the aquatic environment, specially with reference to circulation patterns and susceptibility to eutrophication. In a broad survey carried out by the author in the period 1995-97 over 700 Brazilian lentic systems were analyzed. One of the most interesting conclusions is that these water systems generally present low values of **relative depth** (ratio of maximum depth to average diameter of lake surface). Deep water bodies with small areas have high values of relative depth, while large and shallow lakes show low relative depths. In the Brazilian survey following distribution of values has been found:

Zr (%)	Distribution (%)
0 – 0,5	60
0,5 – 1	21
1 – 1,5	8
1,5 – 2	3
2 – 2,5	3
> 2,5	5

It can be seen that the absolute majority (about 80 %) of surveyed lakes and reservoirs present low relative depths, smaller than 1 %. This means that these systems present frequent vertical circulations, which play a very important role on the quality of the environment. This example shows how the utilization of morphometric parameters can be helpful for a deeper understanding of the system and consequently for the establishment of a sound management.

- *Physical parameters for determining water quality*

Many physical parameters (e.g. temperature, turbidity, colour, taste and odor) are frequently used in order to assess the quality of aquatic environments. In the case of lentic systems (lakes and reservoirs) one of the most informative physical parameters is the **transparency** (Secchi depth), which can be obtained with an extremely simple operational procedure. The values of transparency can extensively inform about light penetration in the water body and consequently give valuable indications concerning the development of primary production. Since tropical aquatic systems are quite individual in their response to the action of environmental forcing factors, the monitoring of transparency should be intensively carried out in order to allow the configuration of time series. In this case the variation of values along time is far more informative than the analysis of absolute values. It is hence strongly recommended that Secchi depth be monitored with the highest possible frequency. Since the *in situ* measurement is very simple even people that live close to the lake or reservoir can satisfactorily carry out the determination. Our experience shows that **daily records of Secchi depth** are frequently more meaningful for lake management than a large set of monthly determinations of selected chemical and biological parameters.

Conclusions

The paper deals with several examples of physical monitoring of lakes and reservoirs in order to get comprehensive informations about structure and function of the water body. This approach has special significance in the case of aquatic environments situated in tropical regions, since these determinations are generally easy to be obtained and uncomplicated to be interpreted. Hence the consideration of physical aspects can, together with further informations of chemical and biological nature, constitute an useful tool for the complex activity of management of lakes and reservoirs.

Acknowledgements

The author is grateful to the financial support of **CNPq** (Brazilian Research Council) and **FAPEMIG** (Research Foundation for the State of Minas Gerais) for the development of the research regarding morphometry of Brazilian lakes and reservoirs.

References

- Imberger, J. et.al. (1998). Dynamics of large stratified lakes. *Proceedings of the Kinneret Symposium on Limnology and Lake Management*, Ginossar, Israel, p.16
- Ryding, S. & Rast, W. (1989). *The control of eutrophication of lakes and reservoirs*. UNESCO, Paris
- Vollenweider, R. (1976). Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33, p. 53-83
- von Sperling, E. (1996). Mechanisms of eutrophication in tropical lakes. *Environmental Pollution*. ICEP 3, European Centre for Pollution Research, London, p. 434-439
- Wetzel, R. (1983). *Limnology*. Saunders Company, Philadelphia, 767 p.

MORPHOMETRIC FEATURES OF BRAZILIAN LAKES AND RESERVOIRS AND THEIR INFLUENCE ON THE WATER QUALITY

Eduardo von Sperling

Federal University of Minas Gerais

Av. Contorno 842 / 706 30110-060 Belo Horizonte BRAZIL

Fax : + 55 31 2381879

E-mail : evsp@net.em.com.br

Introduction

The *morphology* of water bodies is defined as the study of the characteristics of the form of the aquatic system. The measurement of these physical features is the field of work of the *morphometry*. The description of the form of rivers, lakes and reservoirs is made through the use of morphometric parameters. These can be divided into primary parameters (i.e. obtained directly in field researches or in the office) and secondary parameters, which are calculated indirectly from the primary ones. Examples of parameters from the first group are area, volume, maximum depth, length, breadth and perimeter. In the second group the most important ones are relative depth, shoreline development and surrounding factor. All these parameters have a striking influence on the structure and function of the water body and consequently on its water quality. This is particularly true in the case of lentic systems (lakes and reservoirs). Since the water residence time is considerably higher in lentic systems than in the lotic ones (rivers), the influence of the morphometry of the aquatic environment can be easier observed in these slow flowing waters.

The paper presents the results of a broad survey carried out by the author in the period 1994-97 regarding the morphometric characteristics of Brazilian lakes and reservoirs. This study was financially supported by the **Brazilian Scientific and Technological Development Council (CNPq)**. Over 650 lentic systems were analysed with reference to their main morphometric parameters.

Primary morphometric parameters

Area

The five largest Brazilian lentic systems are listed below:

1. Lagoa dos Patos : 9280 km²
2. Sobradinho : 4214 km²
3. Lagoa Mirim : 3520 km²
4. Tucuruí : 2430 km²
5. Balbina : 2360 km²

Numbers 1 and 3 are actually *lagoons*, i.e. aquatic systems situated close to the sea shore and presenting waters with high degrees of salinity. Number 2 is the third largest reservoir in the world (placed after Akosombo, in Ghana, and Guri, in Venezuela). Numbers 4 and 5 are huge reservoirs located in the Amazon flood plain, constructed with the main objective of generating electric energy for the development of the region.

Volume

The five largest Brazilian lentic systems in volume are :

1. Tucuruí : 45,5 km³
2. Sobradinho : 34,1 km³
3. Itaipu : 29 km³
4. Ilha Solteira : 21,2 km³
5. Três Marias : 21 km³

All these systems are man made reservoirs. Number 3 is at present the first one in the world in energy generation (12600 MW). The large Brazilian lagoons are not listed here since they are very shallow environments, presenting hence low volumes.

Maximum depth

The five deepest Brazilian lentic systems are the following :

1. Itaipu : 170 m
2. Emborcação : 140 m
3. Foz do Areia : 135 m
4. Nova Ponte : 127 m
5. Pedra do Cavalo : 120 m

All these water bodies are man made reservoirs. It can be seen that Brazilian lentic systems are typically shallow, mainly with reference to natural lakes.

Secondary morphometric parameters

Mean depth

The mean depth is obtained simply by dividing the volume of the lake or reservoir by its surface area. This parameter is frequently used in mass balance models (e.g. Vollenweider, 1976) for the prediction of phosphorus concentrations in the water body. Many authors have established a mathematical representation of the relationship between mean and maximum depth for different groups of lakes:

- a) $Z_{\text{mean}} = 0,37 \cdot Z_{\text{max}} - 3$ (Tilzer and Serruya, 1990)
- b) $Z_{\text{mean}} = 0,46 \cdot Z_{\text{max}}$ (Wetzel, 1983)
- c) $Z_{\text{mean}} = 0,75 \cdot Z_{\text{max}}^{0,83}$ (Schwarzbold and Schäfer, 1984)
- d) $Z_{\text{mean}} = 0,423 \cdot Z_{\text{max}}$ (Hayes, 1957 in : Cole, 1983)
- e) $Z_{\text{mean}} = 0,41 \cdot Z_{\text{max}}$ (moshinsky, 1970 in : Cole, 1983)

The results obtained in the survey about morphometry of Brazilian lakes and reservoirs lead to the following expression:

$$Z_{\text{mean}} = 2,34 + 0,25 \cdot Z_{\text{max}}$$

Relative depth

One of the most significant secondary parameters is the *relative depth*. It is defined as the relationship between the lake maximum depth and the mean diameter of the water body. The mean diameter is the diameter of a circle that has the same area of the lake. This parameter is expressed in percent unities. Lakes or reservoirs that are very deep but have small areas present high values of relative depth. On the other hand large and shallow water systems have low relative depths. The majority of values (82 %) for the relative depth of the surveyed Brazilian lakes and reservoirs are situated under the limit of 1 %. About 63 % of the results are lower than 0,5 %. . The graph below shows the relationship between area and relative depth for 654 Brazilian lentic systems. It can be seen that the relative depth assumes high values only in the smaller water bodies.

The large Brazilian dams are mostly situated in relatively flat drainage basins, leading to the formation of high impoundment areas with shallow water profiles. The dominance of low values of relative depth points out the excellent mixing conditions found in most of Brazilian lakes and reservoirs, since in this case the water column can be easily affected by the wind force. This natural circulation provides a certain degree of turbidity in the water body, besides moving the phytoplankton from the upper layers to the bottom of the lake. Hence the prevalence of low relative depths can have a positive effect on avoiding the onset of the eutrophication process.

Shoreline development

The shoreline development indicates the ratio of the shoreline length to the circumference of a circle that has the same area as the lake. The values of shoreline development are always higher than the unity. A theoretical exactly circular lake would have a shoreline development equal to 1. The more irregular the shape of the surface area of the lake, the higher is the value of this parameter.

Approximately half of the surveyed lakes and reservoirs present shoreline developments between 1 and 2, while 72 % of the results lie between 1 and 3. Hence the majority of Brazilian lentic systems is quite regular in their shape, in spite of the large amount of reservoirs, which are generally dendritic.

Water bodies with high values of shoreline development are more susceptible to suffer from eutrophication, due to the presence of several shallow bays exposed to light penetration and to accumulation of nutrients. The graph below depicts the relationship between maximum depth and shoreline development. It can be noted a slight trend of proportionality between these two parameters.

Surrounding factor

This parameter is defined as the ratio between the area of the drainage basin and the lake area. Lakes with high values of surrounding factor generally show a clear trend to eutrophication through a potential intense input of nutrients (originated from the relatively large drainage area) and due to the possibility of existence of urban settlements in the drainage basin.

The main characteristic of the distribution pattern of the surveyed lakes and reservoirs is the strong concentration of values in the extreme ranges: more than 50 % of the results are either lower than 50 or higher than 1000. The values ranging from 5 to 300, together with those higher than 1000, represent 83 % of the total amount. Small values of surrounding factors were associated with natural systems (lakes), while the largest ones were only found in artificial systems (reservoirs). Moreover the graph below shows that high values of surrounding factor are generally associated to small water bodies, generally reservoirs.

Conclusions

The results of the research show that the majority of Brazilian lentic systems is quite shallow (in contrast to lakes and reservoirs in other Latin-American countries) and just slightly dendritic. The relative depths are generally low, pointing out the prevalence of very good mixing conditions. This fact has a striking influence on the trophic degree of the aquatic system. High values of surrounding factor are only found in the case of man made lakes, which are usually more protected against the development of eutrophication: the reservoirs are generally situated outside urban areas, thus not receiving the discharge of untreated sewage. It can be finally concluded that morphometric informations are a very useful tool for the comprehension of the functioning of lentic aquatic systems and hence for the management of these water resources.

Acknowledgements

The author acknowledges the financial support received from **CNPq** (Brazilian Research Council) and **FAPEMIG** (Research Foundation of the State of Minas Gerais).

References

COLE, G. (1983). *Textbook of limnology*. C.V. Mosby Company, Toronto, 401 p.

SCHWARZBOLD, A., SCHÄFER, A. (1984). Gênese e morfologia das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Amazoniana* 9, V.1, p. 87-104

TILZER, M., SERRUYA, C. (1990). *Large lakes: ecological structure and function*. Springer Verlag, Berlin, 691 p.

VOLLENWEIDER, R. (1976). Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, V. 33, p. 53-83

WETZEL, R.G. (1983). *Limnology*. Saunders Company, Philadelphia, 767 p.

RESTORATION OF TROPICAL LAKES: A TRADE-OFF BETWEEN THE NEED OF ECOLOGICAL KNOWLEDGE AND THE AVAILABILITY OF FINANCIAL RESOURCES

Eduardo von Sperling

Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Minas Gerais, Av. Contorno 842/7, 30.110-060 Belo Horizonte, Brazil
Tel: + 5531 2381880 Fax: + 5531 2381879 E-mail: eduardo@desa.ufmg.br

ABSTRACT

The lack of financial resources in most of the tropical countries in the world leads to the necessity of a strict policy of investments for recovery of polluted water bodies. The paper presents a suggestion for a simplified monitoring program to be carried out in order to get the necessary informations about the ecological behaviour of lakes and reservoirs. In addition to this comments are made about the most relevant criteria to be adopted for an efficient selection of restoration techniques for tropical lakes.

KEYWORDS

Applied limnology; eutrophication; monitoring; restoration techniques; tropical lakes

INTRODUCTION

The degradation of aquatic systems is a worldwide phenomenon originated from the intense population growth and from the corresponding increase in industrial activities. The need of water for human activities led to population settlements located at the immediate vicinity of rivers and lakes. In a long term these water resources became degraded as consequence of the discharge of several kinds of pollutants, mostly originated from domestic, agricultural and industrial processes. In the case of lentic water bodies (lakes and reservoirs) the impacts of aquatic pollution are more extended due to the low water residence periods and to the physical structure of these systems. Tropical lakes and reservoirs are particularly subjected to the effects of water pollution, considering mainly the frequent discharges of untreated sewage and the complexity of the functioning of these warm water environments. They

generally present a far more intense metabolism than the temperate water bodies, leading to the prevalence of high recycling rates and to very complex relationships between nutrient concentration and biomass formation.

The degradation of the water quality in lakes and reservoirs can be originated from four processes:

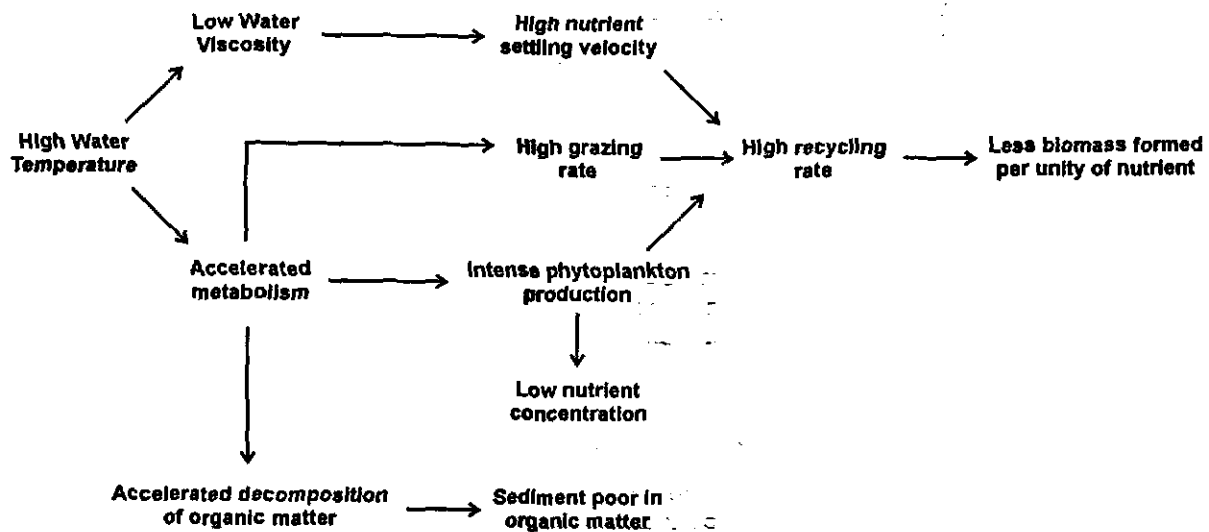
- *contamination*, i.e. the discharge of pollutants such as heavy metals, organic compounds, pathogens directly into the lake or indirectly through its tributaries;
- *siltation*, i.e. the accumulation of mineral matter in the waterbody, leading to a reduction of the usable volume of the lake; the main cause of the siltation of urban lakes is the soil erosion in the drainage basin originated from the opening of new areas for human settlement and from agricultural misuses;
- *eutrophication*, i.e. the excessive enrichment of aquatic plants (algae and macrophytes) due to the discharge of nutrients, impairing the use of the lake for water supply or recreation purposes;
- *acidification*, i.e. the dominance of acidic conditions in the lake as consequence of the receivment of atmospheric precipitations with low pH, which, in its turn, is originated mainly from air pollution processes.

CHARACTERISTICS OF TROPICAL LAKES

Tropical lakes, due to their geographical localization and the inherent climatic conditions, present some typical features, which can be summarized in the following points (von Sperling, 1996):

- a) The intense solar radiation and the high water temperature values accelerate the nutrient uptake by the algae;
- b) The phytoplanktonic population peaks are less frequent in comparison with temperate aquatic environments;
- c) The high nutrient assimilation associated with high recycling rates lead to the prevalence of an intense degree of productivity;
- d) The nutrient concentrations are generally low; as a consequence many water bodies can be classified as oligotrophic in spite of their high productivity;
- e) There is a frequent occurrence of low phytoplanktonic densities, which are however associated with high growth rates;
- f) The high mineralization rates lead to an accelerated oxygen depletion and to the formation of sediments poor in organic matter, consequently there is no direct connection between the hypolimnetic oxygen deficit or the content of organic matter in the sediment and the productivity of the water body;

- g) Due to the temperature the water viscosity is low, leading to a higher settling velocity of organisms and nutrients



RESTORATION OF TROPICAL URBAN LAKES

The strategies usually adopted for controlling the pollution of lakes and reservoirs fall into two categories: the preventive techniques, which are concerned with watershed management and the corrective techniques, which are implemented within the lake.

Examples of the first group are measures for erosion control (revegetation, alteration of agricultural techniques, construction of sewerage systems, wastewater treatment plants with nutrient removal, installation of pre-dams and sedimentation basins).

The corrective measures can be classified in mechanical, chemical and biological processes:

- a) Mechanical processes
- Aeration
 - Destratification
 - Hypolimnetic aeration
 - Sediment removal
 - Sediment covering
 - Deep water withdrawal
 - Algae removal
 - Macrophyte removal

- Shading
- b) Chemical processes
- Precipitation of nutrients
 - Use of algicides
 - Sediment oxidation with nitrate
 - Neutralization
- c) Biological processes
- Biomanipulation
 - Use of cyanophages
 - Use of herbivorous fishes

The success in the use of restoration techniques depends essentially on a well founded knowledge of the *structure* and *function* of the aquatic system. In the case of lakes situated in tropical regions some typical problems can be highlighted, such as the very poor infrastructure for research activities, together with a lack of specialized personnel and the obvious limitation of financial resources. Remedial actions for lake restoration are thus usually undertaken based on an incomplete or even erroneous ecological knowledge (structure + function) about the system. The consequence of this procedure is a frequent failure in the process of lake recovering and the wasting of very precious financial resources originated from public institutions or from *international credits*.

NEED OF ECOLOGICAL KNOWLEDGE X AVAILABILITY OF FINANCIAL RESOURCES

The search of a logical and effective compromise between the need of ecological knowledge about the lake to be restored and the availability of financial resources is probably the most important point to be considered in a recovery strategy for tropical lakes. The necessity of previous informations about the structure and function of the system can only be satisfactorily covered through the implementation of an appropriate monitoring program.

In a broad sense a *monitoring program* can be carried out in order to know the lake system, identify problems, evaluate the conformity of the quality with the intended uses and check the effectiveness of restoration measures. Under a conceptual point of view the main feature of a monitoring program is its *representativity*. The program should contain a clear and sound definition of its basic aspects, namely frequency, location of sampling points and choice of parameters to be monitored. The fact that most of the less developed countries are located in the tropical belt of our planet, with a striking climatic seasonality (rainy and dry periods) leads to the convenience of defining the sampling frequency according to this characteristic. Regarding the choice of the most relevant parameters to describe the water

quality of a tropical urban lake, Table 1 summarizes a suggestion for the basic structure of the monitoring program.

Table 1. Selection of parameters

Fundamental parameters: dissolved oxygen, temperature, Secchi depth, pH
Indicators of decomposition of organic matter: BOD, ammonium nitrogen
Indicators of the presence of salts: conductivity, alkalinity, hardness
Physical indicators: colour, turbidity, suspended solids
Indicators of the presence of nutrients: nitrate nitrogen, soluble reactive phosphorus
Indicators of the presence of contaminants: selected heavy metals, faecal coliforms
Biological indicators: phyto and zooplankton (both composition and biomass)

These selected parameters can be easily analysed with conventional equipments. As a whole they provide a quite reasonable picture about the quality of the system to be restored.

The *morphology* has a strong influence on nearly all physical, chemical and biological parameters of lakes and reservoirs (Wetzel, 1983). It is widely known that the physical dimensions (shape and size) of a lake interact with several climatic and surrounding edaphic factors to determine the nature of the water body as a natural (in the case of lakes) or artificial (in the case of reservoirs) environments. In spite of the importance of morphology in defining the characteristics of the aquatic system its study is generally not carried out with an adequate level of importance. Some main parameters are surprisingly uncomplicated to be obtained, provided there is a minimum of basic information from bathymetric maps. These informations can be used in order to evaluate the quality of the aquatic environment, specially with reference to circulation patterns and susceptibility to eutrophication. In a survey about morphometry of Brazilian lakes and reservoirs, carried out by the author in the period 1995-97, over 700 lentic systems were analysed. One of the most interesting conclusions is the fact that these water systems generally present low values of relative depth (ratio of maximum depth to average diameter of lake surface), what means that they can easily circulate in the colder periods. Consequently the surface layers may become enriched with dissolved oxygen from the bottom (in the case of unpolluted lakes) or suffer negative influences from the circulation of anaerobic layers (in the case of polluted lakes). Moreover the morphometric features of a lake can be successfully used in the definition of prognostic models of eutrophication (Vollenweider, 1976).

Another important issue is related with the *intended water use*. In the case of tropical environments priority is given to water supply, energy generation, recreation and, in some cases, irrigation. Each use presents its own requirements, leading to difficulties in the definition of management strategies for multiple use water bodies and consequently affecting the adoption of adequate restoration measures. Since no single approach or control measure will successfully treat all cases (Ryding and Rast, 1989), special attention should

be dedicated to the *selection of the most appropriate restoration processes*. In this case technical and financial resources limit the application of technologies which are coupled with the use of sophisticated equipments requiring high operation and maintenance costs, such as hypolimnetic aeration or sediment oxidation.

Priority should be given also to those techniques that present a *high level of longevity*, avoiding in this way the implementation of costly measures with short term effects, such as macrophyte removal or use of algicides. The *degree of reliability* is another important feature to be considered in the process of selection of restoration techniques. Some measures, like for instance manipulation of the trophic chain or destratification of the water column have often presented contradictory results and should hence be carefully used in order to avoid wasting of financial resources that would be hardly recovered. Finally emphasis should be dedicated to the aspects of *environmental education*. They play a striking role in the achievement of a sound interaction among scientists, administrators and citizens. This is the only way to guarantee that the restoration of an urban lake will meet the objectives of the community and then justify the investment of precious and at the same time scarce public funds.

CONCLUSIONS

The restoration of tropical urban lakes should be carried out under consideration of the peculiarities of the less developed countries. An optimization in the application of financial resources can be achieved by taking into account some aspects in the selection of restoration techniques: clear definition of the intended uses for the lake, knowledge of structure and function of the aquatic system through the implementation of simplified monitoring programs, survey of basic morphometric parameters, level of longevity and degree of reliability of the possible recovering processes, creation of environmental education programs adapted to regional characteristics.

REFERENCES

- Ryding, S. And Rast, W. (1989). *The control of eutrophication of lakes and reservoirs*. UNESCO, Paris
- Vollenweider, R. (1976). Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33, p.53-83
- von Sperling, E. (1996). Mechanisms of eutrophication in tropical lakes. *Environmental Pollution - ICEP 3*, p. 434-439, European Centre for Pollution Research, London

**THE ROLE OF *RELATIVE DEPTH* IN THE PREDICTION OF EUTROPHICATION OF LAKES
AND RESERVOIRS**

Eduardo von Sperling
Federal University of Minas Gerais
Department of Sanitary and Environmental Engineering
Av. Contorno 842 / 7^o 30110-060 Belo Horizonte Brazil
Tel: + 5531 2381880 Fax: + 5531 2381879 E-mail: evsp@net.em.com.br

Keywords: eutrophication; morphometry; circulation pattern; pollution of lakes and reservoirs

INTRODUCTION

The morphology of water bodies is defined as the study of the characteristics of the form of the aquatic system. The measurement of these physical features is the field of study of the science called *morphometry*. The description of the form of rivers, lakes and reservoirs is made through the use of morphometric parameters. These can be divided into primary parameters (i.e. obtained directly from field researches or in the office) and secondary parameters, which are calculated indirectly from the primary ones. Examples of the first group are *area, volume, maximum depth, length, breadth and perimeter*. In the second group the most important are *relative depth, shoreline development, volume development and surrounding factor* (relationship between the drainage basin area and the surface of the water body). All these morphometric factors have a striking influence on the structure and function of the water body and consequently on its water quality (Cole, 1983). This is particularly true in the case of *lentic* systems (lakes and reservoirs). Since the water residence time is considerably higher in lentic systems than in rivers, the influence of the morphometry of the aquatic environment can be easier observed in these slow-flowing systems. One of the most significant morphometric parameters for describing and predicting the functioning of the aquatic environment is the *relative depth*. This paper discusses the limnological importance of this parameter and presents the results of a broad survey carried out by the author regarding the morphometric features of Brazilian lakes and reservoirs, particularly with reference to the distribution of values of relative depth. The paper stresses also the strong influence of this parameter on the water quality of lentic systems and the convenience of using this information in the prediction of the development of eutrophication. In a broad sense these considerations effectively contribute to the management of lakes and reservoirs, including the adoption of preventive and corrective measures for their conservation or restoration.

RELATIVE DEPTH

The relative depth (Z_R) is defined as the relationship between the maximum depth of the lake or reservoir and the mean diameter of the system. The mean diameter is the diameter of a circle that has the same area of the lake. The result is given in percent unities. Hence:

$$Z_R = 88,6 \cdot Z_{\max} / A^{1/2} \quad [\%]$$

Deep water bodies with small areas present high values of relative depth. On the other hand large and shallow lakes and reservoirs have low relative depths. The main influence of the relative depth on the functioning of the aquatic environment is related with the circulation pattern of the water body. Lakes that are large, but shallow, have no difficulty in circulating vertically their waters. This means that, the upper layers, which are normally rich in dissolved oxygen, can frequently reach the bottom of the lake, contributing therefore to the oxygen supply in the deep layers. On its turn deep lakes with small areas are usually not able to provide oxygen to the deep waters, since vertical circulation is rarely complete. These lakes and reservoirs remain then with a part of their water volume completely isolated, leading to the establishment of permanent anaerobic layers. It can be easily concluded that the faculty of circulating or not the waters has a strong influence on the quality of the aquatic environment, determining also the convenience or limitation of uses. This is particularly important in the case of water supply reservoirs.

EUTROPHICATION

Eutrophication is characterized by the excessive growth of aquatic plants (algae and macrophytes) due to the water enrichment with nutrients. The so-called artificial eutrophication is caused mainly by discharge of untreated sewage in lentic water bodies. It is one of the most important pollution phenomena, leading to serious constraints in the use of the water. The development of eutrophication is closely related to the circulation pattern of the lake or reservoir. The influence of hydrodynamics (vertical circulations) can be considered under two aspects: in unpolluted water bodies vertical circulation is highly desirable, since it contributes to the oxygen supply of the system; on the other hand circulation in polluted aquatic systems can bring high loads of reduced compounds and even toxic materials from the bottom to the surface layers, with catastrophic consequences to the quality of the water body. The knowledge of the relative depth of the system can hence be very useful in predicting the development of eutrophication in polluted and unpolluted waters. Former models for defining critical levels of eutrophication considered *mean depth* (area divided by volume) as the main morphometric parameter (Vollenweider, 1976).

MORPHOMETRIC SURVEY OF BRAZILIAN LAKES AND RESERVOIRS

A broad survey about morphometric characteristics of Brazilian lakes and reservoirs was carried out by the author in the period 1994-97, with financial support from Brazilian Scientific and Technological Development Council (CNPq). About 700 lentic systems were analysed and relationships between morphometry and water quality were consistently developed.

Regarding relative depth the following distribution of values was found:

Z_R (%)	Distribution (%)
0 – 0,5	60
0,5 – 1	21
1 – 1,5	8
1,5 – 2	3
2 – 2,5	3
> 2,5	5

It can be seen that the absolute majority of surveyed lakes and reservoirs (about 80 %) present low relative depths, smaller than 1 %.

The five highest values of relative depth correspond to the following lentic systems:

	Z_R (%)	A (km ²)	Z_{max} (m)
1. São Lourenço (State of Santa Catarina)	13,4	0,06	37
2. Mociminho (State of Minas Gerais)	6,7	0,07	20
3. Serra Branca (State of Minas Gerais)	5,6	0,003	3,5
4. Gameleira (State of Minas Gerais)	5	0,23	27
5. Açude do Jacaré (State of São Paulo)	4,7	0,003	3

The lowest relative depths were found in the following lakes and reservoirs:

1. Peixe (State of Rio Grande do Sul)	0,004	43,7	0,3
2. Patos (State of Rio Grande do Sul)	0,005	9280	5
3. Mangueira (State of Rio Grande do Sul)	0,013	802	4
4. Cipó (State of Rio Grande do Sul)	0,02	2,7	1,6

All these water bodies are coastal lagoons, situated immediately close to the seashore. In the sequence there are 28 lentic systems whose relative depths oscillate between 0,02 and 0,1. It is interesting to observe that the highest values of Z_R are always found in small water bodies, with areas rarely over 1 km². On the other hand low Z_R values are easily found in both large and small systems.

CONCLUSIONS

The study of the distribution of relative depths in Brazilian lakes and reservoirs and their relationship with the water quality leads to following conclusions:

1. Aquatic systems with low relative depths show the prevalence of frequent vertical circulations; in the case of polluted lakes and reservoirs this can bring serious constraints to the water use;
2. Aquatic systems with high relative depths are usually not able to circulate completely; this means that the oxygen supply to the bottom layers is not adequate, bringing also difficulties for the proper use of the aquatic environment;
3. The majority of Brazilian lakes and reservoirs present low values of relative depth, generally under 1 %;
4. The sound utilization of lakes and reservoirs is most certainly achieved when these systems have mean values of relative depth (between 1 and 2 %);
5. The information about morphometric features of aquatic systems, specially with reference to relative depth, can effectively contribute to the important task of predicting the onset of stratification.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

Cole, G. (1983). *Textbook of Limnology*. C.V.Mosby Company, Toronto, 401 p.

Vollenweider, R. (1976). Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 33, p. 53-83

PROFUNDIDADES MÉDIAS DE LAGOS E REPRESAS BRASILEIROS E SUA INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DA ÁGUA

Eduardo von Sperling

Engenheiro Civil e Sanitarista (UFMG, 1974), Mestre em Engenharia Sanitária (UFMG, 1976), Doutor em Ecologia Aquática (Universidade de Berlim, 1989), Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Rua Leopoldina 806/205- Belo Horizonte - MG - CEP: 30330-230 - Tel: (031) 297-3353 e-mail: eduardo@desa.ufmg.br.

RESUMO

O trabalho apresenta os resultados de pesquisa realizada pelo autor referente à morfometria de lagos e reservatórios brasileiros. É dado destaque à utilização do parâmetro *profundidade média* como instrumental para a avaliação de processos físicos que condicionam a qualidade do ambiente aquático. São feitas ainda considerações sobre a utilização deste parâmetro morfométrico em modelos de balanço de massa.

PALAVRAS-CHAVE: limnologia, morfometria, lagos, represas

INTRODUÇÃO

A qualidade da água de ambientes lênticos (lagos e reservatórios) é determinada por uma conjunção de fatores relacionados com processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na bacia de drenagem e no próprio corpo d'água. Tais influências, conhecidas como *fatores de força*, determinam a evolução das diversas funções metabólicas, caracterizadas pela interação dos organismos com o sistema aquático, além de condicionar a dinâmica dos processos físico-químicos que ocorrem na massa líquida. Desta forma obtém-se uma resultante do conjunto de influências, a qual é responsável pelo grau de qualidade da água no ambiente. No entanto existe um outro fator de característica estrutural e ao qual tem sido dedicada relativamente pouca atenção: trata-se da **morfologia** do ambiente aquático. Esta consiste no estudo da *forma* do corpo d'água mediante a utilização de parâmetros descritivos. Por meio do conhecimento destes parâmetros morfométricos pode-se ter uma consistente avaliação da capacidade do ambiente aquático em assimilar impactos poluidores (lançamento de esgotos por exemplo), além de ser possível estimar a tendência evolutiva da qualidade da água.

Os parâmetros que descrevem a morfologia do ambiente aquático são divididos em dois grupos: parâmetros primários (obtidos diretamente por meio de medições feitas *in situ* ou no escritório) e parâmetros secundários (obtidos indiretamente por meio de cálculos). Os principais exemplos do primeiro grupo são *área*, *volume*, *perímetro* e *profundidade máxima*. Dentre os parâmetros secundários os mais significativos são *profundidade média*,

profundidade relativa, desenvolvimento do perímetro e fator de envolvimento. Uma atenção maior deve ser dedicada a este segundo grupo, já que valiosas informações sobre a qualidade da água do lago ou reservatório podem ser extraídas da análise dos parâmetros secundários.

SIGNIFICADO DA PROFUNDIDADE MÉDIA

A **profundidade média** (Z_{med}) de um lago ou de uma represa é dada pela relação entre o volume de água acumulado e a superfície do espelho d'água.

$$Z_{med} = \text{Volume} / \text{Área}$$

Obviamente deve-se atentar para a coerência entre as unidades adotadas (por exemplo, km^3/km^2 ou m^3/m^2), observação esta que é também válida para os itens que vêm a seguir. A profundidade média pode ser também extraída da curva hipsográfica de volume, correspondendo aproximadamente à profundidade onde se acumula 50% do volume do lago (Wetzel e Likens, 1991).

Vários autores têm buscado estabelecer uma relação entre a profundidade média e a profundidade máxima de lagos e represas. Parece predominar uma relação exponencial entre estas duas grandezas, havendo no entanto também expressões matemáticas de configuração linear. Alguns exemplos são apresentados a seguir.

- a) $Z_{med} = 0,37 Z_{max} - 3$ (expressão extraída da morfometria dos lagos com área superior a 500 km^2 , *Large Lakes*) - (Tilzer e Serruya, 1990)
- b) $Z_{med} = 0,467 Z_{max}$ (média de 100 lagos norte-americanos) - (Wetzel, 1983)
- c) $Z_{med} \approx 0,75 Z_{max}^{0,83}$ (lagos gaúchos, Schwarzbald e Schäfer, 1984)
- d) $Z_{med} = 0,423 Z_{max}$ (média de 500 lagos) - (Hayes, 1957 in: Cole, 1983)
- e) $Z_{med} = 0,41 Z_{max}$ (média de 68 lagos canadenses de origem glacial) - (Moshinsky, 1970 in: Cole, 1983)

Deve ser lembrado que as expressões acima listadas provêm de estudos realizados em grande número de lagos, que normalmente apresentam características morfométricas bastante variáveis. Obtém-se assim uma relação de caráter absolutamente empírico (conhecida em Estatística como uma análise do tipo *cross-sectional*) e que retrata a configuração média dos corpos d'água pesquisados. Evidentemente que os resultados deste tipo de pesquisa, na qual se misturam ambientes com distintas características, estão em condições de fornecer apenas uma tendência estatística, não devendo de maneira alguma serem usados para a descrição morfométrica detalhada de sistemas aquáticos

desconhecidos. Quando as pesquisas se restringem no entanto a corpos d'água situados na mesma região e apresentando o mesmo tipo de origem, a confiabilidade dos resultados aumenta consideravelmente. Nestes chamados distritos de lagos (*lake districts*) as características morfométricas são normalmente bastante semelhantes.

Em pesquisa desenvolvida pelo autor, referente à morfometria de cerca de 600 lagos e represas brasileiros, foi obtida a seguinte expressão para o conjunto de ambientes pesquisados:

$$Z_{med} = 2,34 + 0,25 \cdot Z_{max} \quad (n=587)$$

Trata-se portanto de uma representação de caráter linear. Conforme a pesquisa, para a maior parte dos lagos e represas brasileiros a relação Z_{med} / Z_{max} situa-se na faixa de 0,27 a 0,4.

Em um lago de formato perfeitamente cônico a relação Z_{med} / Z_{max} seria igual a 0,33. Índices inferiores só são encontrados em lagos situados em depressões profundas, como é o caso daqueles originários de processos de dissolução de rochas ou de atividades vulcânicas.

Segundo Neumann, 1959 (in:Wetzel,1983), o estudo da morfometria de um elevado número de lagos indicou um formato médio que se aproxima ao de uma elipse senoidal, isto é, um corpo geométrico cuja base é uma elipse e que forma curvas senoidais com planos perpendiculares a esta elipse.

Desta maneira a relação teórica entre Z_{med} e Z_{max} seria de 0,464, que é um valor extremamente próximo daquele proposto na equação b.

Uma interessante aplicação do conhecimento da relação Z_{med}/Z_{max} é a possibilidade de se avaliar indiretamente e de forma aproximada o volume do lago: de posse da profundidade máxima do corpo d'água obtém-se, pelas equações, o valor de Z_{med} ; em seguida, conhecendo-se a área, pode-se estimar o volume do lago ($V = Z_{med} \times A$).

Apenas dois lagos do planeta apresentam profundidades médias superiores a 500 m: lagos **Baical** (730 m) e **Tanganica** (557 m).

Além da profundidade média, podem ser ainda calculadas as profundidades em quartis: Z_{75} (isto é profundidade abaixo da qual se situa 75% da área do lago), Z_{50} e Z_{25} . A profundidade Z_{50} é também conhecida como *profundidade mediana*. Em lagos de formato convexo a profundidade média é superior à mediana, ocorrendo o contrário nos lagos côncavos.

A **profundidade média** participa com frequência de modelos para avaliação da produtividade ou do grau de trofia (i. e. intensidade da produção primária) de ambientes

aquáticos. Já em 1955 Rawson (in: Cole, 1983) propunha uma clara relação inversa entre a profundidade média do lago e o peso da biomassa formada (plâncton).

Thienemann (1927) (in: Cole, 1983) havia sugerido em época bastante anterior, a profundidade média de 18 m como sendo o limite entre as condições eutrófica e oligotrófica de um lago. A relação inversa entre a profundidade média e a produtividade do ambiente foi constatada por diversos outros autores (Wetzel, 1983; Le Cren e McConell, 1980).

Um interessante índice para avaliar a produção piscícola foi proposto por Ryder em 1965 (in: Cole, 1983). O chamado **índice morfoedáfico** combina características do solo (i.e. edáficas, representadas pelo teor de sólidos totais dissolvidos) e da morfologia do lago (representadas pela profundidade média).

$$I. M. = STD \text{ (mg/l)} / Z_{med} \text{ (m)}$$

Quanto maior o valor de I.M. mais elevada é a produtividade pesqueira do ambiente aquático. Na verdade este índice encontra aplicação mais frequente em ecossistemas temperados, já que nos lagos tropicais a produtividade é muito maior, independentemente do valor dos dois parâmetros que compõem o índice. Com relação ao teor salino do ambiente aquático é conveniente lembrar que as produtividades primária e secundária são limitadas tanto por teores excessivos de sais (lagos salinos) quanto por concentrações reduzidas.

O parâmetro **profundidade média** é um componente essencial dos chamados *modelos de balanço de massa*. Tais modelos correlacionam a carga afluenta de uma determinada substância a um corpo d'água e a sua concentração no ambiente aquático. Desta forma podem ser estabelecidos prognósticos de valores de concentrações em função de distintos cenários de aporte de substâncias. Estes modelos de balanço de massa têm sido frequentemente utilizados para o caso do elemento químico fósforo, o qual constitui-se no nutriente limitante em grande parte dos lagos e represas do planeta. Isto significa que o processo de eutrofização pode ser controlado mediante a limitação na chegada de fósforo (geralmente proveniente do lançamento de esgotos) ao ambiente aquático, seja através da construção de canalizações (anéis) interceptoras ou por meio do tratamento de águas residuárias em nível terciário, i.e., com elevado percentual de remoção de nutrientes.

Os modelos de balanço de massa são elaborados considerando-se o sistema como uma caixa preta (*black-box models*), ou seja, são avaliadas apenas as grandezas de entrada (*input*) e de saída (*output*), não sendo feita portanto a modelagem dos processos que ocorrem dentro do sistema. A equação básica destes modelos é :

$$\text{carga afluenta} = \text{carga efluente} + \text{perdas}$$

As perdas podem estar associadas a processos físicos (como sedimentação), a transformações químicas ou à assimilação de compostos pelos organismos aquáticos. A

determinação da parcela de perdas é feita usualmente mediante a realização de medições locais e a posterior associação dos resultados com outros parâmetros ou fatores de força de natureza física, hidrológica ou climatológica que possam influenciar os seus valores. A diferença essencial entre os diversos modelos de balanço de massa para o fósforo consiste nas distintas abordagens sobre a representação matemática da parcela de perdas. A partir desta determinação o modelo pode ser então desenvolvido mediante a incorporação de um grande número de dados empíricos, procedendo-se posteriormente à sua validação.

Também o processo de difusão vertical em um lago ou represa pode ser correlacionado com a profundidade média do ambiente (Le Cren e McConnell, 1980). O coeficiente de difusão é utilizado para o cálculo da intensidade do processo de mistura vertical no corpo d'água. Sua medida é feita determinando-se as variações verticais do conteúdo energético (calor) na massa líquida ou avaliando-se a distribuição ao longo da coluna d'água das concentrações de substâncias dissolvidas. Outra possibilidade para o cálculo do coeficiente de difusão é o uso de traçadores, como compostos radioativos por exemplo. A avaliação deste coeficiente pode ser feita também lançando-se mão de modelos matemáticos.

Verifica-se desta forma o importante papel exercido pela morfologia (mais especificamente pela profundidade média) no estudo dos complexos processos de mistura que ocorrem em lagos e represas. Desta maneira tem-se em mãos um valioso instrumental para auxiliar na tarefa de prognóstico e avaliação da qualidade da água.

AGRADECIMENTOS

O autor manifesta seus agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelos auxílios concedidos para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COLE, G. *Textbook of Limnology*. C.V. Mosby Company, Toronto, 401 p., 1983
2. LE CREN, E. & MCCONELL, R. *The functioning of freshwater ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, 588 p., 1980
3. SCHWARZBOLD, A & SCHÄFER, A. Gênese e morfologia das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul. *Amazoniana* 9, V.1, P. 87-104, 1984
4. TILZER, M. & SERRUYA, C. *Large lakes: ecological structure and function*. Springer Verlag, Berlin, 691 p., 1990
5. WETZEL, R. *Limnology*. Saunders Company, Philadelphia, 767 p., 1983
6. WETZEL, R. & LIKENS, G. *Limnological analyses*. Springer Verlag, New York, 391 P., 1991

The knowledge of morphological features of lakes and reservoirs as an efficient tool for the prediction of eutrophication

Eduardo von Sperling
Federal University of Minas Gerais

Summary

The paper discusses the influence of the main morphometric parameters on the limnology of lakes and reservoirs, particularly in respect to the eutrophication. A case study is presented regarding a survey about morphometric characteristics of over 700 Brazilian lakes and reservoirs. The results indicate that the morphology of Brazilian lentic systems can to a certain extent minimize the development of eutrophication processes.

INTRODUCTION

The degradation of aquatic systems is one of the most important concerns in the field of environmental pollution. Among the distinct pollution processes the eutrophication plays a very relevant role as consequence of its complex biological basis and of the difficulties for its combat. Hence all the perspectives for an efficient prediction of eutrophication development should be taken into account in order to ensure the uses of lake waters on a sustainable basis. The analysis of the morphological features of lakes and reservoirs constitutes a very helpful approach in the prognosis of eutrophication processes.

MORPHOLOGY OF LAKES AND RESERVOIRS

The morphology has a strong influence on nearly all the physical, chemical and biological parameters of lakes and reservoirs [1]. It is widely known that the physical dimensions (shape and size) of a lake or reservoir interact with several climatic and surrounding edaphic factors to determine the nature of the water body as a natural (in the case of lakes) or artificial (in the case of reservoirs) environments.

In spite of the importance of the morphology in defining the characteristics of the aquatic system its study is generally not carried out with the adequate level of profundity. Some main parameters are surprisingly uncomplicated to be obtained, provided there is a minimum of basic information from bathymetric maps. Details about the measurement and analysis of morphometric data can be found in the classical work of Hakanson [2].

The parameters that describe the morphology of lakes and reservoirs (morphometric parameters) can be divided into two groups: primary (obtained directly through measurements in loco or in the office) and secondary (obtained indirectly through calculations). Examples of the first group are volume, area, perimeter and maximum depth. Among the secondary parameters the most important are mean depth, relative depth, shoreline development and surrounding factor. Emphasis should be given to this latter group since valuable informations about the water quality and particularly about the susceptibility to eutrophication can be obtained through the analysis of some secondary parameters, as will be discussed in the next topics.

Department of Sanitary and Environmental Engineering
Federal University of Minas Gerais
Av. Contorno, 842 / 706 30.110-060 - Belo Horizonte Brazil
Fax #: + 55- 31- 238-1879

The **mean depth** is calculated dividing the volume of the lake by its surface area. This parameter is part of several models for prediction of water quality, mainly those related with the evaluation of primary productivity. Already at the beginning of the present century (Thienemann, 1927 in [3]) it was proposed that the boundary between oligotrophy and eutrophy should be based on the mean depth. Generally lakes with low values of mean depth are far more productive than the deep ones.

The **relative depth** (Z_r) is the ratio of the maximum depth to the average diameter of the lake surface. The result is expressed in percentage.

$$Z_r = Z_{\max} \cdot 100 / \text{Aver. Diameter} = 88,6 \cdot Z_{\max} / \sqrt{A} \quad (1)$$

The relative depth is a very useful parameter for describing the circulation pattern of a water body. Lakes with high values of Z_r are generally meromitic i.e. they don't present a complete vertical circulation mechanism. This leads to the establishment of almost permanent anaerobic layers at the bottom of the water body. On the other hand these lakes tend to show higher values of transparency (Secchi depth) since the influence of the wind (acting over small and deep lake basins) is quite limited, which in its turn can lead to a more intense productivity.

The **shoreline development** (D_s) indicates the ratio of the shoreline length to the circumference of a circle that has the same area as the lake.

$$D_s = \text{Shoreline length} / 2 \sqrt{\pi \cdot A} = 0,28 \cdot \text{Shoreline length} / \sqrt{A} \quad (2)$$

The values of shoreline development are always higher than the unity. A theoretical exactly circular lake would have a shoreline development equal to 1. The more irregular is the shape of the surface area of the lake, the higher is the value of this parameter. It is closely related to the development of the eutrophication process: lakes with high values of D_s present several shallow bays, which are quite susceptible to suffer from eutrophication. This phenomenon can then spread quickly to the whole lake. But in many cases there is another influence that counteracts or at least minimizes the onset of eutrophication: dendritic lakes, i.e. with high values of D_s , generally show a well developed and homogeneously distributed shoreline vegetation, which in its turn is able to assimilate considerable loads of nutrients.

Finally the so called **surrounding factor** (S) is calculated dividing the area of the drainage basin by the lake area. Lakes with high values of surrounding factor generally show a clear trend to eutrophication through a potential intense input of nutrients (originated from the relatively large drainage area) and due to the possibility of existence of urban settlements in the drainage basin.

CASE STUDY

The case study here presented is related to a survey of morphological characteristics of Brazilian lakes and reservoirs. The survey was carried out under the coordination of the author, from 1994 to 1996, receiving financial support from CNPq (Brazilian Research Council). A questionnaire was sent to over 200 institutions (environmental agencies, water supply companies, energy companies, universities, research centres) asking for morphometric informations related with lakes and reservoirs under their supervision or where researches have been developed. Inquiries were also made with respect to the water quality, specially concerning the degree of trophic (intensity of primary production). The results are currently being compiled and will be soon published in a book entitled 'Morphology of Brazilian lakes and reservoirs'.

Among the 10 largest Brazilian lentic systems 8 are reservoirs and only 2 are natural lakes. The use of hydraulic energy is widely spread in the country thanks to the existence of a high density of large rivers.

Table 1 : 10 largest Brazilian lakes (area)

1. Patos (actually a lagoon with a narrow connection with the Atlantic Ocean) : 9280 km²
2. Sobradinho (dam) : 4214 km²
3. Mirim (lagoon) : 3520 km²
4. Tucuruí (dam) : 2430 km²
5. Balbina (dam) : 2360 km²
6. Porto Primavera (dam) : 2140 km²
7. Itaipu (dam) : 1350 km²
8. Furnas (dam) : 1350 km²
9. Ilha Solteira (dam) : 1260 km²
10. Três Marias (dam) : 1142 km²

In respect to the maximum depth it can be concluded that Brazilian lakes and reservoirs are generally shallow aquatic systems. The survey showed that currently no Brazilian water body is deeper than 200 m.

Table 2: Lakes deeper than 100 m

1. Itaipu : 170 m
2. Emborcação : 140 m
3. Foz do Areia : 135 m
4. Nova Ponte : 127 m
5. Salto Santiago : 109 m
6. Segredo : 101 m

The results related with the relative depth are preferably presented in ranges instead of using the classical statistical indicators (mean, standard deviation etc), which are not able to show conveniently the irregular distribution of the values:

0 - 0,5 % : 125 ; 0,5 - 1 % : 36 ; 1 - 1,5 % : 15 ; 1,5 - 2 % : 8 ; 2 - 2,5 % : 3 ; > 2,5 % : 10

It can be clearly seen that the absolute majority of values for the relative depth (82 %) are situated under the limit of 1 %. About 63 % of the surveyed lakes and reservoirs show relative depths lower than 0,5 %. This morphometric parameter assumes high values only in the smaller water bodies. A simple example can illustrate this statement: for reaching a relative depth of e.g. 4% a lake of 2000 m² should present a maximum depth of 2 m, while for an water body of 2000 km² (quite common in our planet) it would be necessary a maximum depth of 2000 m, which is found nowhere in the world. The two deepest lakes in the planet, Lake Baikal (1741m) and Lake Tanganika (1471m), present relative depths of respectively 0,85% and 0,7%, which can be considered as quite low values. The large Brazilian dams are mostly situated in relatively flat drainage basins, leading to the formation of high impoundment areas with shallow water profiles. This situation points out the excellent mixing conditions found in most of Brazilian lakes and reservoirs, since in this case the water column can be easily affected by the wind force. This natural circulation provides a certain degree of turbidity in the water body, besides moving the phytoplankton from the upper layers to the bottom of the lake. Hence the prevalence of low relative depths can have a positive effect on avoiding the onset of the eutrophication process. Also the results of the shoreline development calculations are here conveniently presented in interval ranges:

1 - 2 : 70 ; 2 - 3 : 31 ; 3 - 4 : 9 ; 4 - 5 : 5 ; 5 - 6 : 7 ; 6 - 7 : 5 ; 7 - 8 : 1 ; 8 - 9 : 1 ; 9 - 10 : 2 ; > 10 : 7

Approximately half of the surveyed lakes and reservoirs present shoreline developments between 1 and 2, while 72 % of the results lie between 1 and 3. The majority of Brazilian lentic systems is not dendritic, in spite of the large amount of reservoirs. These results indicate that most of Brazilian lakes and reservoirs are morphologically not highly susceptible to eutrophication.

The distribution of values of surrounding factor is as follows:

0-50:60;50-100:30;100-200:21;200-300:20;300-400:8;400-500:11;500-600:4;600-700:7;700-800:4; 800-900:2;900-1000:2;>1000:61

The main characteristic of this distribution pattern is the strong concentration of values in the extreme ranges (initial and final). More than 50% of the results are either lower than 50 or higher than 1000. The values ranging from 0 to 300 together with those higher than 1000 represent 83% of the total amount. Small values of surrounding factor are associated with natural systems (lakes) while the largest ones are only found in artificial systems (reservoirs). In the latter case the filling up of the water basin follows the morphology of the terrain in the drainage basin, leading to the formation of water bodies with quite irregular shapes.

CONCLUSIONS

The results here presented about a morphological survey of Brazilian lakes and reservoirs lead to the evidence that Brazilian lentic systems are generally shallow water bodies. The low relative depths point out the dominance of good mixing conditions. The prevalence of low shoreline developments indicates in its turn some constraints to the eutrophication development due to the limitation in the formation of short circuits or zones of very slow water movements. High values of surrounding factor are found only in the case of reservoirs, which are usually more protected against the development of eutrophication since they are generally not situated in urban areas, thus not receiving the discharge of untreated sewage.

The parallel evaluation of the water quality showed that the trends here presented are valid in most of the cases. The most conspicuous examples of eutrophic lentic systems in Brazil are found in urban lakes with high relative depths, large shoreline developments and large surrounding factors.

In spite of the known limitations in the use of morphological features (poor data accuracy, restricted capacity of generalization) these informations should be considered as a very helpful tool in the complex activity of management of lakes and reservoirs.

REFERENCES

1. Wetzel, R. Limnology, Saunders Company, Philadelphia, 1983
2. Hakanson, L. A manual of lake morphometry, Springer Verlag, Berlin, 1981
3. Thinemann in: Cole, G. Textbook of Limnology, Mosby Company, St. Louis, 1983

MORFOLOGIA DE LAGOS E REPRESAS: A IMPORTÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO PERÍMETRO

VON SPERLING, EDUARDO

[01] O estudo da morfologia de lagos e represas pode constituir-se em um significativo auxílio na avaliação da qualidade de suas águas. Alguns parâmetros morfométricos, como a profundidade máxima por exemplo, são capazes de fornecer preciosas indicações sobre a possível dinâmica dos processos aquáticos. O presente trabalho pretende destacar a relevância limnológica de um parâmetro morfométrico relativamente pouco pesquisado e divulgado, que é o desenvolvimento da margem ou do perímetro. O desenvolvimento do perímetro é obtido pela relação entre o perímetro do lago ou represa e a circunferência de um círculo que tenha a mesma área do lago ou represa. Sua formulação matemática é portanto:

$$Dp = \frac{P}{2\pi R} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} [-]$$

onde:

P: perímetro do lago

R: raio do círculo de área igual à do lago

A: área do lago

Corpos d'água absolutamente circulares possuem um $Dp = 1$. Quanto mais irregular for o contorno das margens, maior é também o valor do parâmetro. Desta forma o desenvolvimento do perímetro reflete adequadamente a importância da região litorânea no metabolismo aquático. Se por um lado a existência de extensas faixas de comunidades litorâneas pode favorecer a absorção ou assimilação de pulsos poluidores externos, por outro lado os diversos braços encontrados em ambientes com elevados desenvolvimento do perímetro podem também indicar uma maior suscetibilidade à eutrofização. O trabalho discorre mais detalhadamente sobre a influência limnológica do desenvolvimento do perímetro. Nos anos de 1994 a 1996 o autor desenvolveu um projeto de pesquisa, com financiamento do CNPq, referente à morfologia de lagos e represas brasileiras. Dos cerca de 150 valores calculados para o desenvolvimento do perímetro obteve-se uma faixa oscilando entre 1,1 e aproximadamente 20, com predomínio absoluto (70%) de resultados no intervalo de 1,5 a 4,5. O tratamento estatístico destes dados morfométricos é apresentado no trabalho completo.

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Contorno, 842/706 - 30.110-060 - Belo Horizonte - MG

MORFOLOGIA DE RESERVATÓRIOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL E SUA RELAÇÃO COM A QUALIDADE DA ÁGUA

Eduardo von Sperling

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Contorno 842/7º andar - 30.110-060 - Belo Horizonte - Brazil

Tel: +5531 238.1882

Fax: +5531 238.1879

Resumo

O trabalho apresenta inicialmente a relação existente entre a morfologia de reservatórios e a qualidade de suas águas. São feitos comentários sobre os principais parâmetros morfométricos (área, volume, profundidade média, máxima e relativa, desenvolvimentos da margem e do volume, fator de envolvimento), destacando-se sua vinculação com a qualidade da água. Finalmente são apresentados os dados de pesquisa morfológica realizada em 88 reservatórios do Estado de Minas Gerais, juntamente com a interpretação dos resultados obtidos.

Abstract

The paper deals initially with the relationship between morphology and water quality in reservoirs. Comments are made about the main morphometric parameters (area, volume, mean, maximum and relative depths, shoreline development, volume development and involvement factor), with emphasis on the water quality issues. Finally the results of a research related with the morphology of reservoirs in the State of Minas Gerais, Brazil are presented, together with the data interpretation.

Introdução

A *morfologia* de um corpo d'água consiste no estudo da sua forma, sua origem e sua influência limnológica, ou seja, como estes fatores afetam a ecologia aquática. A quantificação e medida dos diversos elementos da forma recebe o nome de *morfometria*.

Embora sejam relativamente pouco utilizados, os dados morfométricos fornecem um valioso instrumental para a avaliação da qualidade do ambiente aquático. No caso particular de reservatórios, que caracterizam-se pelas elevadas profundidades e pela conformação irregular das margens, a interpretação dos parâmetros morfométricos é ainda mais significativa.

Principais parâmetros morfométricos e sua relação com a qualidade da água

Os parâmetros morfométricos primários estão relacionados ao comprimento, largura, área, volume e profundidade do reservatório. Para um conhecimento mais detalhado sobre a determinação prática destes parâmetros sugere-se uma consulta à clássica obra de HAKANSON (1981). Embora tais parâmetros possam ser obtidos sem grandes

dificuldades o seu significado limnológico (i.e. sua relação com a qualidade da água) é geralmente bastante restrito. Apenas as profundidades máxima e média apresentam uma influência mais marcante, já que sabidamente os corpos d'água profundos têm um comportamento ecológico distinto daquele encontrado nos ambientes rasos. Assim sendo a *profundidade máxima* do reservatório constitui-se em um dos parâmetros morfométricos de maior importância. Da mesma forma o ponto de profundidade máxima é o mais relevante dentro de um programa de monitoramento, pelo fato de retratar com maior fidelidade as condições reinantes no ambiente. Os reservatórios profundos estão mais sujeitos ao estabelecimento de camadas de densidade, fenômeno este conhecido como estratificação. Nestas condições ocorre um isolamento da região profunda (hipolimnio), com efeitos prejudiciais ao balanço de oxigênio, atingindo-se frequentemente anoxia e consequente predomínio das formas reduzidas dos compostos químicos. Esta situação é indesejável tanto em reservatórios para geração de energia (solubilização de sais de ferro e posterior sedimentação de lama ferruginosa nos componentes mecânicos) quanto naqueles construídos para abastecimento de água (precipitação de compostos de ferro e manganês na rede distribuidora, solubilização de sais de fósforo e consequente crescimento de plantas aquáticas).

A *profundidade média* do reservatório é obtida simplesmente pela relação entre o volume e a área do corpo d'água. Este parâmetro participa frequentemente de diversos modelos para avaliação e prognóstico da qualidade da água. Assim sendo existe uma clara correlação inversa entre a profundidade média e a densidade do fitoplâncton (microalgas e bactérias) (COLE, 1983), ou seja, em geral quanto mais raso o reservatório maior é a sua produtividade. O clássico modelo de balanço de massas desenvolvido por VOLLENWEIDER (1976) indica uma estreita relação positiva entre a profundidade média e a capacidade do corpo d'água em absorver pulsos poluidores externos. Vale dizer portanto que reservatórios profundos são mais resistentes a problemas de contaminação e eutrofização. Uma correlação positiva foi encontrada também entre a profundidade média e o coeficiente de difusão vertical (LE CREN e LOWE-Mc CONNELL, 1980), evidenciando a influência da morfologia no comportamento térmico do corpo d'água.

Além da profundidade média existem outros parâmetros morfométricos secundários, isto é, obtidos a partir dos parâmetros primários. Na verdade são os parâmetros secundários aqueles que apresentam maior significado em sua relação com a qualidade da água. Os principais exemplos são a profundidade relativa, o desenvolvimento da margem, o desenvolvimento do volume e o fator de envolvimento.

A *profundidade relativa* é conceituada como a relação entre a profundidade máxima e o diâmetro médio do reservatório (i.e., diâmetro de um círculo que tenha a mesma área do reservatório). Portanto sua formulação matemática é:

$$Z_R [\%] = \frac{Z_{\max}}{D_{\text{médio}}} \times 100 = \frac{Z_{\max} \times 100}{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}} = 88,6 \times \frac{Z_{\max}}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Assim sendo reservatórios pequenos e profundos apresentam elevados valores de profundidade relativa, enquanto que aqueles grandes e rasos mostram a situação inversa. A profundidade relativa é um parâmetro bastante útil para descrever as condições de estratificação e circulação do reservatório. Corpos d'água com elevadas profundidades relativas (p.ex. superiores a 5%) podem apresentar dificuldades para circular toda a coluna d'água sob condições de isoterminia, o que exerce influência marcante na qualidade da água. Estes ambientes aquáticos de circulação restrita são denominados *meromíticos*. Neles é frequente o predomínio de situações de ausência de oxigênio dissolvido na região de fundo, exatamente pela falta de circulação da massa d'água. Além disso reservatórios com altos valores de Z_R são menos expostos aos efeitos do vento, o que implica normalmente em águas mais transparentes, oferecendo assim melhores condições para realização da fotossíntese (maior penetração dos raios solares). Consequentemente estes ambientes são em geral mais produtivos.

O *desenvolvimento da margem* (também chamado desenvolvimento do perímetro) é obtido pela relação entre o perímetro do reservatório e a circunferência de um círculo que tenha a área do corpo d'água. Sua formulação matemática é:

$$Dp [-] = \frac{\text{Perímetro}(P)}{2\pi R} = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{A}{\pi}}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Os valores de Dp são sempre superiores a 1, que é o resultado a ser obtido para um corpo d'água perfeitamente circular. Quanto mais irregular for o contorno das margens maior será portanto o valor de Dp . Reservatórios, que são ambientes construídos pelo homem, apresentam, devido ao seu processo de formação, desenvolvimentos de margem bem superiores aos encontrados em lagos naturais. Quando o valor de Dp é elevado (superior a 3 ou 4) o corpo d'água é denominado dendrítico (do grego *dendron*, árvore). Nestes casos a região litorânea assume um importante papel na configuração da qualidade da água, já que ela ocupa uma parte considerável do ecossistema aquático. Os reservatórios que possuem comunidades litorâneas (macrófitas, perifiton) bem desenvolvidas conseguem absorver com maior facilidade os impactos poluidores (como p.ex. lançamento de esgotos). Por outro lado corpos d'água dendríticos podem apresentar maior suscetibilidade à eutrofização nos seus braços, que constituem ambientes favoráveis ao crescimento de vegetação (menor circulação de água, baixas profundidades).

O *desenvolvimento do volume* é definido pela relação entre o volume do reservatório e o volume de um cone cuja superfície seja equivalente à do corpo d'água e a altura correspondente à sua profundidade máxima. Assim sendo,

$$Dv = \frac{\text{Volume}(V)}{\frac{1}{3} A \cdot Z_{\max}} = \frac{3Z_{\text{média}}}{Z_{\max}} \quad (3)$$

Este parâmetro fornece uma clara indicação sobre a forma da bacia hidráulica do reservatório: se o valor for inferior a 1 o corpo d'água tem a forma convexa, estando contido dentro da configuração de um V; se o D_v for superior a 1, o que ocorre na maioria dos casos, a forma do reservatório é côncava, extrapolando a configuração de um V e aproximando-se mais daquela de um U. Outra informação derivada do cálculo de D_v é o estudo da relação entre as profundidades média e máxima. Na maior parte dos lagos constata-se que $Z_{média}$ é superior a um terço de $Z_{máx}$. Dentre os parâmetros morfométricos secundários o desenvolvimento do volume é aquele de menor relevância limnológica, sendo a sua interpretação útil apenas em conjunto com outras informações.

O último parâmetro morfométrico de importância em associação com a qualidade da água é o chamado *fator de envolvimento*. Ele é obtido por meio da relação entre a área da bacia de drenagem (bacia hidrográfica) e a do próprio reservatório.

$$F.E. = \frac{A_{bacia}}{A_{reserv.}} \quad (4)$$

Quanto mais elevado for F.E. maior é a contribuição potencial da bacia de drenagem com relação ao carreamento superficial de nutrientes e de contaminantes, além de serem também maiores as possibilidades de ocupação urbana na área da bacia. Altos valores de fator de envolvimento indicam portanto uma maior suscetibilidade do reservatório em sofrer as consequências dos fenômenos de eutrofização, assoreamento e contaminação.

Morfologia de reservatórios no Estado de Minas Gerais

O Estado de Minas Gerais, situado na Região Sudeste do Brasil apresenta uma farta disponibilidade de recursos hídricos. Em seu território estão localizadas as nascentes de grandes rios brasileiros, o que conferiu ao Estado a popular denominação de “caixa d'água” do país. Dentre os ambientes lênticos (lagos e reservatórios) do Estado o predomínio absoluto em termos de área e de volume cabe aos reservatórios, construídos em sua maioria para a geração de energia elétrica. Atualmente 96,8% da energia brasileira é obtida por meio de geração hidráulica, em contraposição à média mundial de 19% (ELETROBRÁS, 1995). Outro uso bastante frequente de reservatórios é para abastecimento de água, principalmente nas áreas metropolitanas das maiores cidades. Cabe ainda destacar a construção de reservatórios para finalidade de irrigação, o que ocorre notadamente nas regiões Norte e Nordeste do Estado.

Durante os anos de 1995 e 1996 foi desenvolvida pelo autor uma pesquisa, com financiamento do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), objetivando um abrangente levantamento dos dados morfométricos de lagos e reservatórios brasileiros, conjuntamente com sua associação com a qualidade da água. Neste trabalho são apresentados os primeiros resultados referentes aos reservatórios situados no Estado de Minas Gerais.

Na Tabela 1 são fornecidos os principais parâmetros morfométricos dos dez maiores reservatórios no Estado de Minas Gerais.

Dos 88 reservatórios pesquisados apenas 12 (14%) apresentam área superior a 100 Km², enquanto que 20 (23%) possuem mais de 10 Km². Portanto a maior parte dos reservatórios do Estado de Minas Gerais (63%) tem área inferior a 10 Km².

Quanto ao volume 13 reservatórios (15%) possuem um acúmulo de água superior a 1 Km³. As profundidades máximas são quase sempre inferiores a 100 m (98%) e a 50 m (89%), evidenciando o predomínio de ambientes de ambientes aquáticos relativamente rasos em comparação com dados de outros continentes.

Os dez maiores reservatórios do Estado de Minas Gerais apresentam profundidades relativas inferiores a 0,6%, confirmando a configuração de sistemas pouco profundos em relação à sua área e sujeitos a frequentes alternâncias de períodos de estratificação e circulação. Apenas 18% dos reservatórios exibem profundidades relativas acima de 2%, sendo que destes só 2 ultrapassam a faixa de 5% de profundidade relativa, o que pode indicar limitação para a circulação completa da massa líquida.

O desenvolvimento do perímetro é o parâmetro morfométrico de mais difícil obtenção, considerando-se a escassez de dados confiáveis sobre o perímetro dos reservatórios. Das 14 informações coletadas constata-se que 50% indicam desenvolvimentos do perímetro superiores a 3,5, o que caracteriza formatos tipicamente dendríticos. O mais alto valor calculado foi 6,9, referente a um reservatório de 6 Km² de área.

TABELA 1 - Dados morfométricos dos 10 maiores reservatórios de Minas Gerais

Reservatório	Área (Km ²)	Volume (Km ³)	Z média(m)	Z máx. (m)	Z _R (%)	Dp	Dv	FE
Furnas	1350	20,9	16	98	0,2	-	0,5	35
Três Marias	1142	21,0	18	56	0,2	1,2	1,0	44
Itumbiara	760	17,0	22	83	0,3	-	0,8	12
São Simão	722	12,5	17	73	0,2	-	0,7	237
Água Vermelha	643	11,0	17	55	0,2	-	0,9	218
Emborcação	455	17,6	39	140	0,6	-	0,8	64
Nova Ponte	440	12,8	29	127	0,5	-	0,7	35
Marimbondo	438	6,2	14	61	0,3	2,5	0,7	266
Peixoto	250	4,0	16	44	0,3	-	1,1	238
Volta Grande	222	2,3	10	28	0,2	1,5	1,1	310

Os valores de desenvolvimento^o do volume apontam uma distribuição homogênea em torno da unidade: 54% com Dv < 1 e 46% com Dv > 1. Apenas 17% dos reservatórios situam-se fora da faixa 0,6-1,4 o que confirma uma tendência observada em lagos e represas em todo o mundo, ou seja, formatos da bacia hidráulica não exageradamente côncavos ou convexos.

Finalmente com relação ao fator de envolvimento obteve-se uma forte variabilidade de resultados (12 a 16.700), o que é compreensível em função das diversas características topográficas dos reservatórios existentes no Estado de Minas Gerais. Observa-se no

entanto um certo padrão na distribuição dos fatores de envolvimento: em geral quanto menor a superfície do corpo d'água maior é relativamente a área da bacia de drenagem. No caso de grandes reservatórios a própria área do espelho d'água já ocupa uma considerável parte da bacia hidrográfica. Esta tendência pode ser verificada no cálculo das médias aritméticas de FE:

FE (5 maiores reservatórios): 78
FE (10 maiores reservatórios): 146
FE (20 maiores reservatórios): 270
FE (88 reservatórios): 1664

Conclusão:

Os resultados da pesquisa realizada em reservatórios no Estado de Minas Gerais mostra que nesta região predominam corpos d'água de médio e pequeno porte, (< 10 Km²) com profundidades máximas quase sempre inferiores a 50 m. As profundidades relativas não são elevadas (maioria inferior a 2%), indicando que tais reservatórios circulam frequentemente toda a coluna d'água, o que é um fenômeno geralmente benéfico para a homogeneização da qualidade da água. A configuração dos reservatórios não é fortemente dendrítica, conforme a distribuição dos valores do desenvolvimento do perímetro. O desenvolvimento do volume dos reservatórios oscila em torno da unidade, confirmando uma tendência observada em corpos d'água de todo o planeta. Os fatores de envolvimento são, em sua maioria, elevados, caracterizando um claro potencial de poluição por parte das bacias de drenagem (eutrofização, contaminação, assoreamento por carreamento superficial).

Referências bibliográficas

COLE, G. - **Textbook of limnology** - C.V. Mosby Company, Toronto, 1983, 401p. >

ELETROBRÁS - **Plano Decenal de Expansão (1995-2004)**, Ministério de Minas e Energia, Brasília, 1995

HAKANSON, L.- **A manual of lake morphometry**. Springer Verlag, New York, 1981, 77p.

LE CREN, E. e LOWE-McCONNELL- **The functioning of freshwater ecosystems** - Cambridge University Press, Cambridge, 1980, 588p.

VOLLENWEIDER, R. - Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. **Mem. Ist. Ital. Idrobiol.** 33:53-83 , 1976.