



**ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS**



**ABES ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**I SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

QUALIDADE DA ÁGUA

**IMPACTOS AMBIENTAIS PROVOCADOS POR RESERVATÓRIOS  
DE USOS MÚLTIPLOS, EM ESPECIAL AQUELES ASSOCIADOS  
À VEGETAÇÃO SUBMERSA**

Ivanildo Hespanhol, Ph.D. Eng<sup>o</sup> Civil e Sanitarista,  
CNEC/USP, S. Paulo, Brasil  
Julio A.M. Hernandez, Eng<sup>o</sup> Civil, CNEC, S. Paulo, Brasil  
Luiz Nicanor L. Silveira, Eng<sup>o</sup> Civil, CNEC, S. Paulo, Brasil

RESUMO

O carbono orgânico e os nutrientes, que são elementos constituintes dos vegetais, provocam, quando submersos, problemas de qualidade de água significativos, principalmente os associados à manutenção do Oxigênio dissolvido no hipolímio e ao nível trófico dos reservatórios. Nesse sentido é importante estabelecer a quantidade de biomassa a ser removida da área de inundação a fim de que a qualidade da água seja mantida dentro de características pré-estabelecidas, em função dos usos a que se destina.

A definição das etapas de realização das atividades de desmatamento e das quantidades de vegetação a serem removidas durante o processo de implantação de reservatórios, constitui-se em um estudo multidisciplinar, uma vez que envolve a consideração conjunta de elementos tais como: custos associados ao processo de desmatamento, alterações na qualidade das águas represadas devido aos mecanismos de dissolução e degradação da vegetação inundada, valor comercial da madeira, prazos disponíveis para a realização das atividades, configurações hidrologicas e operacionais de análise, etc..

A consideração e sistematização integrada desses elementos constitui-se na motivação básica para o desenvolvimento deste trabalho, no qual efetua-se a proposição de uma metodologia de característica multidisciplinar, que culmina com uma orientação precisa, em termos cronológicos, para efetuar o desmatamento e na definição dos quantitativos e qualitativos de biomassa a serem removidos.

Para tanto, são utilizadas técnicas pertinentes ao campo de Pesquisa Operacional, na forma de um modelo de simulação da qualidade das águas do reservatório durante o processo de enchimento (modelo ERSE), e na forma de um modelo de programação linear, cuja função-objetivo consiste em maximizar as relações benefício-custo, procurando atender às restrições impostas pelas diferentes variáveis consideradas.



## 1 - INTRODUÇÃO

A conceituação moderna da implantação de grandes reservatórios não considera o empreendimento como atividade fim, orientada exclusivamente para a utilização dos recursos hídricos em um cenário setorial exclusivo, como geração de energia elétrica, por exemplo. Os reservatórios passaram para o repertório das obras consideradas meio, visando o desenvolvimento socio-econômico-cultural da região beneficiada e, na grande maioria das vezes são projetados sob a visualização de utilização múltipla.

Entretanto, a implantação de um grande reservatório gera problemas ambientais significativos, afetando drasticamente os meios físicos, biológicos e socio-culturais das áreas de inundação e de influência.

A identificação, quantificação e atenuação de impactos ambientais vêm tomando, nas últimas décadas, um significado importante, uma vez que se verificou que os efeitos provocados são cumulativos e que a tomada tardia de decisões implica em custos consideravelmente maiores do que aqueles associados às ações profiláticas, que devem ser executadas nas fases de implantação e início de operação.

Os estudos efetuados a partir de 1975 pelo Grupo do Banco Mundial (que inclui o International Bank for Reconstruction and Development, a International Development Association e a International Finance Corporation), demonstraram que os custos adicionais associados à proteção ambiental e da saúde pública atingem um máximo de 3% do custo total dos projetos de grandes reservatórios.

Da multiplicidade de problemas e impactos provocados pela implantação de grandes reservatórios de água, os aspectos associados às quantidades de biomassa mantida na área de inundação são de primordial importância porque condicionam e limitam a utilização do recurso hídrico acumulado e do próprio reservatório como um todo, tanto durante a fase de enchimento como durante a fase de utilização.

Este trabalho tem por objetivo correlacionar as quantidades de biomassa inundadas com os níveis correspondentes de qualidade da água e usos do reservatório através de uma nova metodologia que emprega um modelo de simulação e um sistema de programação linear, integrados para otimizar economicamente e tecnicamente as atividades associadas ao desmatamento.

## 2 - CONCEITUAÇÃO DO PROBLEMA

A grande maioria dos métodos para a quantificação da biomassa a ser removida das áreas de inundação, se baseia simplesmente em cálculos de concentrações de determinados parâmetros que são esperados no reservatório, em função de diversos níveis de desmatamento, sem a otimização de todas as variáveis envolvidas e sem, o que é mais importante, vincular a quantidade de biomassa que pode ser mantida na área de inundação com o uso mais restritivo que se pretende fazer do recurso hídrico acumulado no reservatório.

Assim, se as águas são destinadas ao abastecimento doméstico, deve ser estabelecida uma quantidade de biomassa tal que não provoque a depleção do  $O_2$  dissolvido abaixo de valores pré-estabelecidos e não permita uma concentração de Clorofila "a" que gere condições eutróficas ao reservatório.

Para a geração de energia, é importante manter condições aeróbias nas proximidades das barragens, de maneira a evitar a formação de gás sulfídrico que ataca as turbinas e instalações, e de metano que, associado ao ar sucionado junto às tomadas de água, pode provocar explosões capazes de danificar as estruturas de tomadas.

Quando navegação, pesca comercial, recreação e lazer forem atividades contempladas no plano de utilização, o destocamento passará a ter importância para permitir, respectivamente, o deslocamento de barcos com calados previamente estabelecidos, possibilitar o livre deslocamento das redes de arrasto e dar condições estéticas e de segurança para o desenvolvimento de esportes náuticos.

Se os recursos hídricos forem utilizados para irrigação, a qualidade da água passará também a ter importância, principalmente do ponto de vista bacteriológico, salinidade, pH (deve ser alcalina) e com relação a substâncias tóxicas para as plantas (principalmente boro).

Esses exemplos demonstram que as quantidades de biomassa a serem removidas, assim como os locais onde a recreação deve ser efetuada, necessitam ser determinadas em função dos usos previstos para o reservatório.

Além disso, as atividades de desmatamento devem ser cronologicamente vinculadas aos planos de fechamento dos reservatórios a fim de evitar rebrota e consequentemente aumento dos custos de desmatamento, e ao regime hidrológico, correspondente ao período de enchimento, para possibilitar o cálculo correto das concentrações de parâmetros considerados relevantes, na massa hídrica acumulada.

### 3.- QUALIDADE DA ÁGUA

As alterações que ocorrem durante o enchimento de reservatórios, são regidas por mecanismos de elevada complexidade, face aos processos de transporte e mistura das águas, bem como as interações que se processam no novo ambiente aquático em contato com o ecossistema terrestre.

A deterioração da qualidade da água armazenada em reservatórios, face à presença de elementos orgânicos e inorgânicos, oriundos da vegetação inundada, pode ocorrer, principalmente, devido aos seguintes processos:

- decomposição de matéria orgânica presente, provocando a eliminação parcial ou total de Oxigênio dissolvido na água, o qual é consumido em reações bioquímicas de estabilização. Este fenômeno afeta principalmente as condições da vida aquática.

- também, como resultado da decomposição de matéria orgânica, no caso desta estar presente em maiores proporções, pode ocorrer uma produção elevada de  $CO_2$ , e, em condições anóxicas, de  $H_2S$ ,  $CH_4$  e outros gases. Outros problemas tais como corrosão de turbinas e estruturas de ferro e concreto, explosões, anorexia da fauna aquática, e exalação de odores desagradáveis, também podem ocorrer como consequência da formação desses gases.

- o terceiro aspecto da degradação é vinculado à dissolução de nutrientes (principalmente os macronutrientes, N e P), oriundos da vegetação inundada. Os prejuízos são resultantes da proliferação excessiva de microorganismos e aumento significativo da produção primária. Em determinadas condições, poderá ocorrer a proliferação de macrofitas aquáticas (tais como a *Eichornia crassipes*, vulgarmente denominada aguapé, e outras espécies), as quais além de estabelecerem condições favoráveis para procriação de mosquitos, caramujos e outros vetores, provocam problemas no circuito hidráulico das usinas e elevam os custos de tratamento dos sistemas de abastecimento de água.

Deve ser considerada, ainda, a possibilidade de ocorrer a dissolução de eventuais elementos tóxicos provenientes da vegetação, prejudicando os sistemas de tratamento de água para abastecimento público.

Embora estes efeitos tenham caráter temporário, ocorrendo com maior intensidade durante a fase de enchimento, alguns deles podem originar problemas a longo prazo, de difícil solução, onerando e dificultando a utilização do re

servatório, para os fins propostos, além de causar prejuízos ao meio ambiente, tanto nas áreas de influência, como a jusante dos reservatórios.

#### 4 - OS MODELOS MATEMÁTICOS

Embora não existam, até o momento, informações científicas suficientes, que permitam correlacionar dados básicos com fatores bióticos e sua interação com o ecossistema aquático, alguns parâmetros de qualidade da água, tais como Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, nitratos e fosfatos solúveis, e produtividade primária, além de outras características hidroquímicas, podem ser acompanhados, com relativo grau de aproximação, através de modelos cinéticos.

Tais modelos, no caso da estabilização de matéria orgânica proveniente de vegetação inundada, são capazes de caracterizar o processo fundamentalmente através de duas reações de primeira ordem, a saber:

- degradação da matéria orgânica fixa ao solo;
- dissolução da mesma na massa líquida, quando sujeitas aos fenômenos de oxidação e transporte advectivo e dispersivo.

Os componentes conservativos, oriundos da vegetação inundada ficam sujeitos apenas ao processo de dissolução na massa líquida e aos fenômenos de transporte advectivo e dispersivo.

Com base nesses elementos teóricos, torna-se possível estimar o impacto dos componentes carbonáceos e nitrogenados incorporados ao lago sobre os teores de Oxigênio da água, bem como as interações entre os nutrientes (Nitrogênio e Fósforo) e a biomassa das populações de fitoplâncton e zooplâncton.

Este último aspecto vem complementar a detecção de mudanças nos teores de Oxigênio dissolvido e determinar o possível nível eutrófico do lago, através da utilização de taxas de crescimento celular em função dos teores de Fósforo e Nitrogênio inorgânicos.

Por outro lado, como consequência da estabilização dos componentes carbonáceos da vegetação inundada torna-se possível avaliar, teoricamente, a produção de gás carbônico, cuja interação com a massa líquida e os fenômenos de transporte a ela associados, produzem alterações físico-químicas previsíveis. Esta previsão consiste em estabelecer, em primeira aproximação, os mecanismos de dissolução e difusão do gás, bem como o equilíbrio entre as espécies carbonícas na massa líquida, conduzindo à estimativa dos níveis de agressividade ou incrustação, de acordo com índices já estabelecidos (Critérios de Langelier, Riznar, etc.).

Da mesma forma, em condições de anaerobiose, pode ser também avaliada a produção de  $CO_2$ ,  $H_2S$  e  $CH_4$ , e através dos mecanismos de transporte de massa e equilíbrios químicos, estabelecer suas concentrações, e avaliar os possíveis efeitos prejudiciais inerentes.

#### 5. O MODELO ERSE (ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO SECCIONADO)

Para o problema do enchimento de reservatórios e a quantificação dos efeitos em função da vegetação inundada, um enfoque unidimensional, na maior parte dos casos, pode conduzir a resultados satisfatórios. Esta hipótese básica levou ao desenvolvimento do Modelo ERSE que considera o reservatório subdividido em diversos segmentos convenientemente escolhidos, nas quais se assume mistura completa.

O modelo, cuja versão original foi apresentada no 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, sob o título "Análise do Impacto na Qualidade das Águas de um Reservatório na Fase de Enchimento", pelo Dr. Guillermo Raul Fernandes D'Oliveira, do CNEC, compõe-se, basicamente, de dois submode

los, um deles para a simulação da parte hidráulica do enchimento e outro para a simulação do balanço de matéria orgânica, Oxigênio dissolvido e outros parâmetros.

O submodelo hidráulico tem como informação de entrada as características geométricas dos segmentos (cota de base, comprimento, área e volume em condições de rio, segmentos adjacentes e áreas do espelho d'água em diferentes níveis de referência). São dadas as características de cada uma das interfaces (segmentos adjacentes e coeficientes de dispersão), a vazão de saída pela barragem e as vazões entrantes em cada um dos segmentos.

O incremento do nível de água é calculado segundo a expressão:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{QN}{\sum_{j \in \text{Lago}} A_j} \quad (1)$$

Sendo  $QN$  a vazão líquida de enchimento, calculada em cada passo de tempo e  $A_j$  a área média do espelho d'água para o segmento  $j$  no mesmo passo de tempo.

A variação líquida de volume de cada segmento pertencente ao lago formado é dada pela expressão:

$$\frac{dV_j}{dt} = A_j \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

e as vazões transferidas entre os segmentos são calculadas mediante um balanço de massa de acordo com a expressão:

$$\sum_{k \text{ adjacente } j} Q_{kj} = \frac{dV_j}{dt} \quad (3)$$

onde  $Q_{kj}$  é a vazão que passa do segmento "k" ao "j" ( $Q_{kj} = -Q_{jk}$ ).

O segundo submodelo resolve o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\frac{dR_j}{dt} = 2,67 Dv_j \left( \frac{dA}{dv} \right)_j \frac{dV_j}{dt} - (k_1 + k_2) R_j \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} (V_j L_j) = \sum_{k \text{ adjacente a } j} (\text{Fluxo advectivo} + \text{dispersivo}) + K_2 R_j - K_3 V_j L_j \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} (V_j O_j) = \sum_{k \text{ adjacente a } j} (\text{Fluxo advectivo} + \text{dispersivo}) - K_1 R_j - K_3 V_j L_j + k_a V_j (O_{S_j} - O_j) \quad (6)$$

$$\frac{dF_j}{dt} = f Dv_j \left( \frac{dA}{dv} \right)_j \frac{dV_j}{dt} - k_4 F_j \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} (V_j C_j) = \sum_{k \text{ adjacente a } j} (\text{Fluxo advectivo} + \text{dispersivo}) + K_4 F_j \quad (8)$$

Onde, para cada segmento  $j$ , tem-se:

- $R_j$  = DBO da vegetação fixa ao solo (kg de DBO)
- $DV_j$  = densidade de vegetação (kg de C-O/m<sup>2</sup>)
- $L_j$  = DBO dissolvida na massa líquida (mg/l)
- $O_j$  = concentração de Oxigênio dissolvido na massa líquida (mg/l)
- $OS_j$  = concentração de Oxigênio à saturação (mg/l)
- $F_j$  = conteúdo de substâncias conservativas da vegetação fixa ao solo (kg)
- $f$  = fator que indica a proporção de substâncias conservativas em relação ao conteúdo de carbono orgânico da vegetação inundada
- $C_j$  = concentração de substâncias conservativas dissolvidas na massa líquida (por exemplo N, P, S, etc, em mg/l)
- $k_1$  = taxa de biodegradação aeróbia de vegetação fixa ao solo (dia<sup>-1</sup>). Eventualmente substituída pela taxa aeróbia  $k_1'$
- $k_2$  = taxa de dissolução aeróbia de matéria orgânica na massa líquida (dia<sup>-1</sup>). Eventualmente substituída pela taxa anaeróbia  $k_2'$ .
- $k_3$  = taxa de biodegradação aeróbia de matéria orgânica dissolvida na massa líquida (dia<sup>-1</sup>). Eventualmente substituída pela taxa anaeróbia  $k_3'$ .
- $k_a$  = taxa de reoxigenação por difusão de ar atmosférico na massa líquida (dia<sup>-1</sup>)
- $k_4$  = taxa de dissolução de substâncias conservativas em condições aeróbias (dia<sup>-1</sup>). Eventualmente substituída pela sua correspondente anaeróbia  $k_4'$ .

Os parâmetros cinéticos  $k_1$  a  $k_4$  podem ser estimados com base em algumas experiências de laboratório, embora isoladas, ou através da calibragem direta do modelo preconizado, aplicada a outros reservatórios monitorados durante a fase de enchimento.

Durante a anaerobiose (OD = 0), utiliza-se ainda a equação diferencial de balanço de OD para ser comparada com o fluxo entrante de Oxigênio por advecção, dispersão e difusão atmosférica com o consumo potencial que haveria em condições aeróbias ( $K_1 R_j + K_3 V_j L_j$ ). Assume-se que todo o Oxigênio entrante é consumido pelas substâncias redutoras presentes na água. No momento que o fluxo entrante supera este consumo potencial de Oxigênio, volta a presença desse parâmetro na massa líquida.

Durante os processos, pode ser estimada a produção de gases decorrentes da decomposição aeróbia (principalmente CO<sub>2</sub>) e anaeróbia (principalmente CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S).

De acordo com Fair & Moore, a produção dos gases pode também ser considerada por meio de reações de primeira ordem, levando-se principalmente em conta a temperatura e a relação carbono-nitrogênio orgânicos.

A máxima produção de gás na decomposição anaeróbia da matéria carbonácea pode ser estimada pela fórmula:

$$g_{\text{máx}} = 0,506 \cdot T^{0,5} \frac{1,08 \cdot 10^{0,0469} (Co/No - 1)}{10^{0,0608} - Co/No} \quad (\text{lt gás/gr C}) \quad (9)$$

onde:

T = temperatura °C

Co/No = relação carbono - nitrogênio orgânicos da vegetação.

A equação (9) é considerada válida para temperaturas de digestão compreendidas entre 10 e 37°C.

Entretanto, o que interessa realmente não é apenas a quantidade de gás produzida, mas fundamentalmente, a taxa de produção do mesmo em função da matéria orgânica carbonácea.

Considerando o desenvolvimento e incremento das bactérias anaeróbias, a equação representativa da produção de gás assume a seguinte forma:

$$\frac{dgt}{dt} = x (g_{\text{máx}} - gt) \quad (10)$$

onde:

$g_{\text{máx}}$  = máxima produção possível de gás, calculada pela equação (9)

gt = produção de gás em l/gr C

t = tempo de digestão

x =  $0,0183 \times 10^{0,03 T} f (Co/No)$

T = temperatura de digestão

$f (Co/No) = \frac{1,167 \cdot 10^{0,0469} (Co/No - 1)}{10^{0,0608} Co/No}$

A capacidade de absorção do gás é estimada através da equação diferencial de 1ª ordem:

$$\frac{dCg}{dt} = p + K_L \frac{A}{V} (Cgs - Cg) \quad (11)$$

onde:

p = taxa de produção de gás em l gás/m<sup>3</sup> x dia  
= gt x gramas de C-O biodegradados/m<sup>3</sup> x dia

$K_L$  = coeficiente de transferência do gás pela camada líquida em m/dia

A e V = área e volume do reservatório

Cg = concentração do gás na massa líquida

Cgs = concentração de saturação do gás

De forma a simplificar as avaliações, são consideradas proporções fixas dos elementos constituintes do gás resultante do processo de digestão anaeróbia, sendo 65% de CH<sub>4</sub>, 35% de CO<sub>2</sub> e apenas 0,2% de H<sub>2</sub>S no total.

Através da estimativa de CO<sub>2</sub> livre liberado durante o processo e, admitindo valores iniciais do mesmo composto e da alcalinidade total das águas afluentes, são utilizadas as constantes de ionização e os métodos de cálculo apresentados no Standard Methods para avaliação das possíveis alterações do



potencial hidrogênico das águas, embora admitindo a ressalva de que este último parâmetro regula a própria atividade bacteriana que provoca a formação dos gases.

A expressão básica utilizada é a seguinte:

$$[CO_2] = \frac{2 \text{ Alk} - 5 \times 10^{(ph - 10)}}{1 + 0,94 \times 10^{(ph - 10)}} \times 10^{(6 - PH)} \quad (12)$$

onde:

$[CO_2]$  = concentração de  $CO_2$  em mg/l na massa líquida

Alk = alcalinidade total em mg/l de  $Ca CO_3$

O modelo ERSE fornece diretamente os parâmetros DBO, OD e parâmetros conservativos tais como: N, P, S, resolvendo basicamente as equações diferenciais de (1) a (8).

Os mecanismos representados pelas equações (9) a (12), não foram ainda incorporados definitivamente ao programa ERSE, tendo sido avaliados de forma separada com base nos resultados do Modelo em relação ao desenvolvimento da degradação da matéria orgânica carbonácea.

Ainda, futuramente, outros mecanismos poderão ser incorporados tais como a dinâmica de formação das comunidades de fitoplâncton e zooplâncton e sua incidência nos teores de Oxigênio dissolvido.

No estágio atual do modelo, as condições de operacionalidade são garantidas com uma entrada flexível e simples de dados para rodadas sucessivas e com saídas gráficas que facilitam qualquer análise dos resultados. O fim da simulação é determinado automaticamente ao se atingir o enchimento, um nível predeterminado de OD em todos os segmentos ou ao se atingir o tempo máximo prefixado.

## 6 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE

O desmatamento de áreas de reservatórios a serem inundados, principalmente, aqueles de grandes dimensões, se apresenta, frequentemente, associado a custos relativamente elevados.

Para a formulação da metodologia de análise, tendo em vista o número de elementos envolvidos, e o aspecto multidisciplinar do problema, tornou-se necessária a utilização de um enfoque pertinente ao campo da Análise de Sistemas, cujas etapas, em termos resumidos, são apresentados em seguida.

A verificação de alguns dos estudos anteriormente efetuados visando a definição das quantidades de vegetação a serem removidas, revela, quase sempre, o predomínio de um ou mais enfoques sobre os demais. Além disso, a não inclusão, nesses estudos de elementos ligados à qualidade da água represada (e a outros aspectos de preservação do meio ambiente) tornam-os incompletos e pouco representativos dos fenômenos que ocorrem durante a fase de enchimento de reservatórios.

Em vista dos elementos anteriormente expostos, a proposição adotada para este estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia, para tornar possível a determinação dos quantitativos de biomassa a remover e dos cronogramas associados às atividades de desmatamentos, incorporando, conjuntamente, elementos de todos os campos envolvidos, inclusive os relativos à economicidade e máxima eficiência do processo.

Nesse sentido considerou-se como adequada, a utilização de uma metodologia de características otimizantes, optando-se pela Programação Linear como a principal ferramenta de análise do problema.

As etapas julgadas necessárias para a realização deste estudo são as seguintes:

- Levantamento de Dados;
- Determinação de Parâmetros de Qualidade de Água;
- Análise Conjugada dos Elementos Disponíveis.

Na etapa de Levantamento de Dados, busca-se a incorporação de todas as informações consideradas necessárias para a realização das etapas subsequentes.

A etapa de Determinação dos Parâmetros de Análise, objetiva a obtenção de elementos específicos dos diferentes campos envolvidos no processo, os quais não podem ser incorporados diretamente às equações de restrição, componentes do processo de Programação Linear.

Na etapa de Análise Conjugada dos Elementos Disponíveis, são considerados, conjuntamente, as informações e os parâmetros determinados nas etapas anteriores, surgindo como produto a estimativa, em termos quantitativos, das áreas a serem desmatadas e os respectivos intervalos de tempos estimados para o desmatamento. A aplicação destes intervalos de tempos a uma rede de precedência das operações de desmatamento, definida em termos das facilidades e condições locais, permite a utilização de técnicas pertinentes ao campo de Gerenciamento de Projeto PERT (Program Evaluation and Review Technique) ou CPM (Critical Path Method), tornando possível a elaboração dos cronogramas de remoção da vegetação.

Essas três fases (Levantamento de dados, determinação de parâmetros de análise e análise conjugada, são abordados a seguir a fim de especificar as atividades que as compõem.

#### 6.1 - LEVANTAMENTO DE DADOS

Como citado anteriormente, esta etapa, busca a incorporação de todas as informações consideradas necessárias para a realização das etapas subsequentes.

Para melhor ilustrar a natureza de tais informações, é apresentada uma relação resumida de dados a serem coletados, estruturada segundo seis níveis de abordagem:

- a - Nível I - Informações Gerais
- b - Nível II - Informações Relativas à Vegetação a ser Inundada
- c - Nível III - Informações sobre os Aspectos Hidrológicos
- d - Nível IV - Informações Relativas à Qualidade das Águas
- e - Nível V - Facilidades e Obstáculos ao Processo de Desmatamento
- f - Nível VI - Informações Acerca do Processo de Gerenciamento das Atividades de Remoção de Vegetação

#### 6.2 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS

Para a definição de elementos relativos à qualidade das águas, utilizadas na matriz de decisão a ser posteriormente descrita, utiliza-se o modelo ERSE descrito no item 5.

Como resultado da aplicação do modelo ERSE a diferentes níveis de intervenção na quantidade de vegetação inundada no reservatório, torna-se possível a definição de curvas referenciais de qualidade das águas durante o processo de enchimento.

Por meio destas curvas, onde constam, nas abcissas, as quantidades de vegetação inundada, e nas ordenadas, os correspondentes níveis assumidos pelos parâmetros de qualidade considerados, torna-se possível a definição dos coeficientes angulares  $\alpha_{ij}$ , a serem utilizados nas equações de restrição posteriormente abordadas.

### 6.3 - ANÁLISE CONJUGADA DOS ELEMENTOS DISPONÍVEIS

O modelo básico de Programação Linear consiste em:

- Determinar os valores de  $X_j$  ( $j= 1,2,3,\dots,n$ ), de forma a tornar extremo (máximo ou mínimo) o valor  $Z_j$  de uma função-objeto linear das variáveis  $x_j$ , respeitado que, simultaneamente, outras funções lineares das mesmas variáveis ou equações de restrições previamente estabelecidas não ultrapassem certos valores-limites.
- a formulação clássica é, pois:

maximizar  $Z = \sum_j c_j \cdot x_j$  ( $j = 1,2,3,\dots,n$ ), respeitado que:

$$\sum_j \alpha_{ij} \cdot x_j < b_i \quad (j = 1,2,3,\dots,n, i = 1,2,3,\dots,n)$$

e que, ainda, os valores de  $x_j$  não sejam negativos, isto é, que:

$$x_j \geq 0$$

- Os coeficientes  $c_j$ , na função acima, podem assumir valores negativos, positivos ou nulos; os valores de  $b_i$ , no entanto, são supostos sempre como positivos, enquanto que  $\alpha_{ij}$  são coeficientes negativos, nulos ou positivos.

Efetuada esta breve introdução sobre a técnica de Programação Linear, passe-se, agora à abordagem da estrutura de aplicação da mesma visando a definição das quantidades de vegetação a serem removidas na área inundada de um reservatório.

Para a definição da função-objeto, dois enfoques tornam-se possíveis. No primeiro, associado a vegetações desprovidas de valor comercial, a função-objeto consiste em:

$$\text{minimizar } Z = \sum_{i,j} c_{ij} \cdot A_{ij} \quad (j = 1,2,3,\dots,n) \\ (i = 1,2,3,\dots,n),$$

sendo:

$A_{ij}$  - área, a ser removida da vegetação tipo  $i$ , no segmento  $j$ ;

$C_{ij}$  - custo associado a remoção da vegetação tipo  $i$  no segmento  $j$ .

Por outro lado, para a consideração de madeiras dotadas de valor comercial, a função-objeto assume a seguinte forma:

$$\text{maximizar } Z = \sum_{i,j} (B_{ij} - C_{ij}) \cdot A_{ij} \quad (j = 1,2,3,\dots,n) \\ (i = 1,2,3,\dots,n),$$

onde:

$B_{ij}$  - o valor comercial associado à vegetação tipo  $i$ , no segmento  $j$ .

Para a montagem das equações de restrição concorrem os demais elementos julgados significativos. Assim, como exemplo, na estrutura que se segue, são considerados parâmetros associados à qualidade das águas e à disponibilidade de temporal e de recursos para a realização das atividades de desmatamento.

$$\begin{aligned} \sum A_{ij} &\leq A_j \\ - \sum \alpha_{ij}^{OD} \cdot A_{ij} &\leq -OD_j \\ \sum \alpha_{ij}^{DBO} \cdot A_{ij} &\leq DBO_j \\ \sum \alpha_{ij}^P \cdot A_{ij} &\leq P_j \\ \sum V_{ij} \cdot A_{ij} &\leq T \\ \sum C_{ij} \cdot A_{ij} &\leq C \end{aligned}$$

sendo:

$$A_{ij} \geq 0$$

onde:

- $A_j$  - área total da vegetação inundada no segmento  $j$ ;
- $\alpha_{ij}^k$  - coeficiente que associa níveis de Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Fósforo (P) ou outro parâmetro à quantidade de vegetação tipo  $i$ , presente no segmento  $j$ ;
- $k_j$  - concentração-objetivo associada aos parâmetros OD, DBO e P, no segmento  $j$ ;
- $V_{ij}$  - velocidade estimada para a realização das atividades de remoção da vegetação tipo  $i$ , no segmento  $j$ ;
- $T$  - tempo total disponível para a realização das atividades de desmatamento;
- $C$  - disponibilidade total de recursos para a realização das atividades de desmatamento.

Assim, como produto resultante desta análise, torna-se possível a definição das quantidades de vegetação a serem removidas, referenciadas às respectivas espécies e áreas de localização. Também como produto desta mesma análise, surge a definição dos tempos de realização das atividades de desmatamento, cuja posterior aplicação a técnicas pertencentes ao campo de gerenciamento de projetos (PERT ou CPM), conduz a formulação do cronograma de remoção da madeira, na área a ser futuramente inundada pelo reservatório.

Finalizando, fica a ressalva de que, em alguns casos poder-se-ão verificar soluções não factíveis, tornando-se, em consequência, necessário o reprocessamento das informações disponíveis sob a forma de equações de restrição menos rígidas.

Isto, porém, não se configura como um elemento negativo na presente metodologia, uma vez que a estrutura desenvolvida para a mesma orientou-se na busca de uma adequada flexibilidade operativa, como forma de não apenas permitir um rápido reprocessamento das informações já existentes, mas também visando a possibilitar a incorporação de novos elementos que, porventura, se façam necessários, tais como, possíveis avanços tecnológicos, ou restrições de cunho financeiro ou político.

## 9 - CONCLUSÕES

Conforme demonstrado no início deste trabalho, a experiência conseguida em termos de implantação de reservatórios revela que a remoção da vegetação a ser inundada se apresenta como um fator de extrema importância para a manutenção da qualidade de água no reservatório em regime transitório, durante o enchimento.

Em alguns países existem leis específicas sobre a matéria, que, geralmente, preconizam a remoção total da vegetação presente na área a ser inundada. Invariavelmente, as condicionantes de ordem econômica tornam o cumprimento dessas leis praticamente inviável, sendo mais acentuada tal inviabilidade na medida em que aumentam as dimensões do reservatório.

No Brasil, por exemplo, a Lei nº 3.824 de 25 de novembro de 1960, "torna obrigatória a destoca e conseqüente limpeza das bacias hidráulicas dos açudes, represas ou lagos artificiais".

É importante considerar ainda que, os propósitos operacionais do reservatório podem não se configurar como tão exigentes em termos da qualidade de águas, trazendo como conseqüência a não necessidade da remoção total da vegetação a ser inundada, o que provocaria, no caso, um flagrante desperdício de recursos.

Torna-se, portanto, imprescindível compatibilizar o nível de realização das atividades de remoção de vegetação com os propósitos operacionais do reservatório a ser implantado.

Logicamente, no caso de reservatórios concebidos para utilização múltipla, tendência predominante nos tempos atuais, a necessidade de consideração conjunta destes e de outros elementos passa a se constituir em uma tarefa complexa, assumindo características multidisciplinares.

A necessidade de tal abordagem multidisciplinar, característica não apenas de reservatórios projetados, visando múltiplos usos, mas também os de utilização setorial única, constituiu-se na motivação básica para o desenvolvimento da presente metodologia.

Em conseqüência, a estrutura concebida para a mesma objetivou, fundamentalmente, possibilitar a incorporação equilibrada da totalidade dos elementos considerados significativos, segundo este mesmo contexto multidisciplinar, de forma a tornar mais eficiente e econômico o processo de definição da quantidade de vegetação a ser removida e do cronograma de realização das atividades de desmatamentos na área a ser inundada pelo reservatório.

Deve também ser observado que a presente metodologia apresenta-se como potencialmente aplicável em dois horizontes distintos: o primeiro, em nível de viabilidade do empreendimento, com base em informações preliminares, tornando possível uma avaliação aproximada das quantidades de vegetação a remover e dos correspondentes custos associados; a segunda, realizada a nível de projeto executivo, e baseada em levantamentos específicos sobre os diferentes aspectos envolvidos, apresenta, como produtos finais, acarreta a definição da quantidade de vegetação a remover e do respectivo cronograma de realização das atividades de desmatamento.

### BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- 1 - O'Connor, Donald J., Thomann, Robert V., and Di Toro, Dominic M. - Dynamic Water Quality Forecasting and Management - U.S. Environmental Protection Agency - Washington, D.C. 20460 - 1ª - 1973, 201.
- 2 - National Academy of Sciences - Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives Proceedings of a Symposium - National Academy of Sciences - Washington, D.C. 20418 - 1969, 661.
- 3 - Lorwenthal, R. e and Marais, G.v.R. - Carbonate Chemistry of Aquatic Systems - Ann Arbor Science Publishers INC - P.O. Box 1425, Ann Arbor, Michigan 48106, 1ª - 1976, 433.
- 4 - D'Oliveira, Guillermo Raul Fernandes - Análise do impacto na qualidade das águas de um reservatório na fase de enchimento - 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - 1 - 1,31 - 1979.
- 5 - Darwich, Assad José - Estudos Limnológicos na Represa Hidrelétrica de Curuá-Una (Santarém-PA) - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - 1982 - 207.
- 6 - Paiva, Melquíades Pinto - Algumas considerações sobre a Represa de Brokopondo (Suriname) - ELETROBRÁS - 1977 - 61.
- 7 - Salas, Henry J. and Thomann, Robert V. - A Steady-state phytoplankton model of Chesapeake Bay - Journal Water Pollution Control - 50 - 2752-2770, 1978.
- 8 - Wetzel, Robert G. - Limnology - W.B. Saunders Company - West Washington Square Philadelphia, PA 19105 - 1ª - 1975 - 743.
- 9 - Cole, Gerald A. - Textbook of Limnology - The C.V. Mosby Company - Saint Louis - 1ª - 1975 - 283.
- 10 - Margalef, Ramón - Ecologia - Ediciones Omega, S.A. - Casanova, 220 Barcelona - 11 - 1ª - 1974 - 951.
- 11 - Bennett, C.O. and Myers, J.E. - Fenômenos de transporte, quantidade de movimento, calor e massa - Editora Mc Graw-Hill do Brasil, Ltda. - SP - 1ª - 1978 - 812.
- 12 - Branco, Samuel Murgel e Rocha, Aristides Almeida - Poluição, Proteção e Usos Múltiplos de Represas - CETESB/Edgard Blücher Ltda. - 1ª - 1977 - 185.
- 13 - CESP - Reservatórios, Modelo Piloto do Projeto Integral - CESP, Livraria Cultura Editora - São Paulo - 1ª - 1978 - 119
- 14 - Degrémont - Manual técnico del água - Degrémont - 1ª - 1973 - 1.142

IMPACTOS AMBIENTAIS PROVOCADOS POR RESERVATÓRIOS  
DE USOS MÚLTIPLOS, EM ESPECIAL AQUELES ASSOCIADOS  
À VEGETAÇÃO SUBMERSA

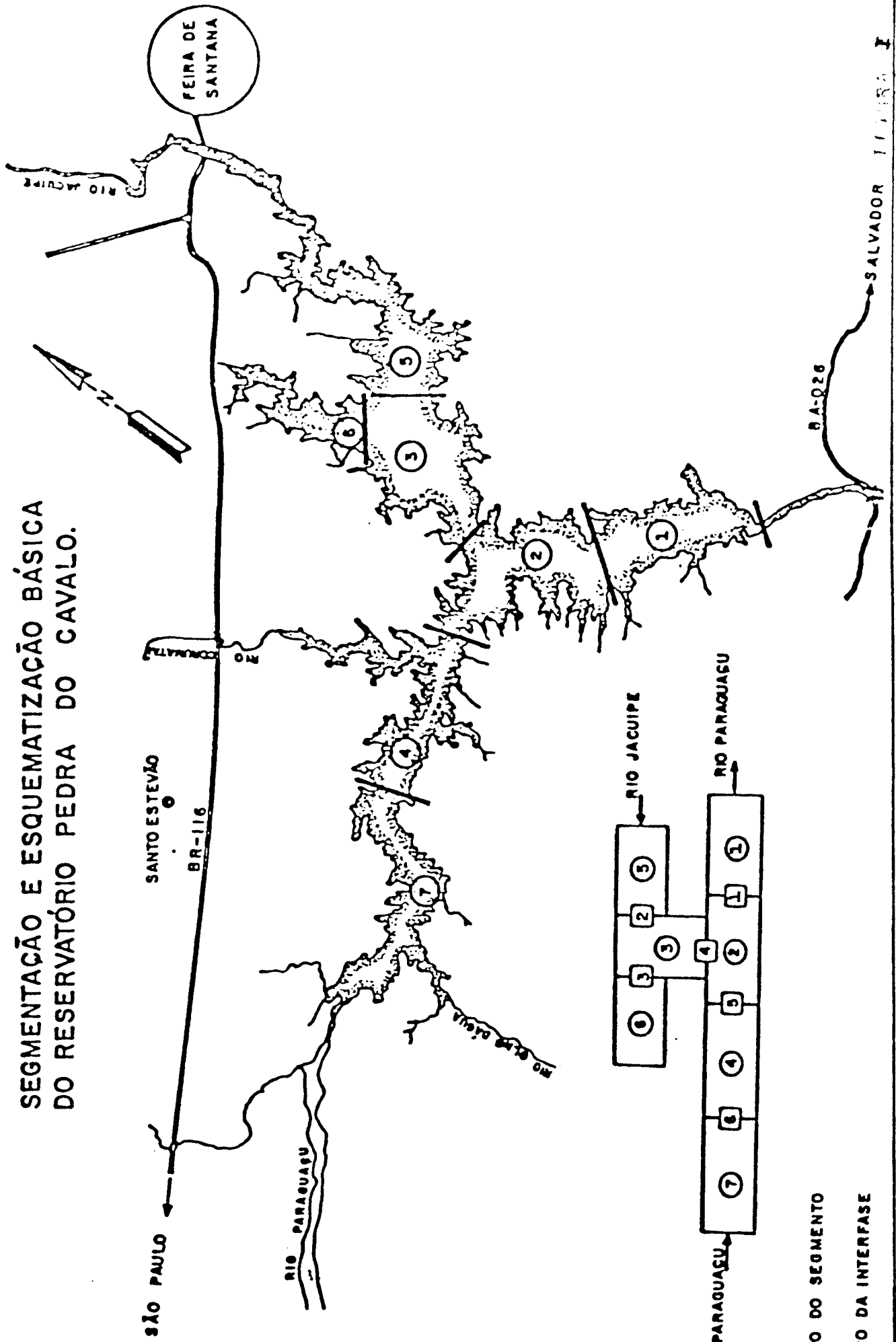
A N E X O

APLICAÇÃO DO MODELO ERSE A ALGUNS  
RESERVATÓRIOS BRASILEIROS



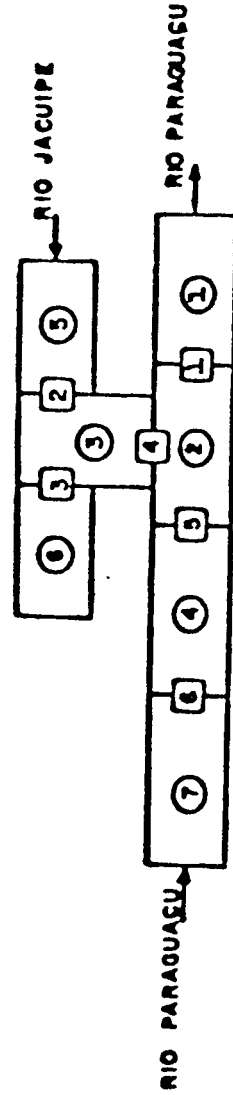


SEGMENTAÇÃO E ESQUEMATIZAÇÃO BÁSICA DO RESERVATÓRIO PEDRA DO CAVALO.



○ NÚMERO DO SEGMENTO

□ NÚMERO DA INTERFASE



CURVAS COTA-ÁREA DE INUNDAÇÃO POR  
SEGMENTOS DO RESERVATÓRIO

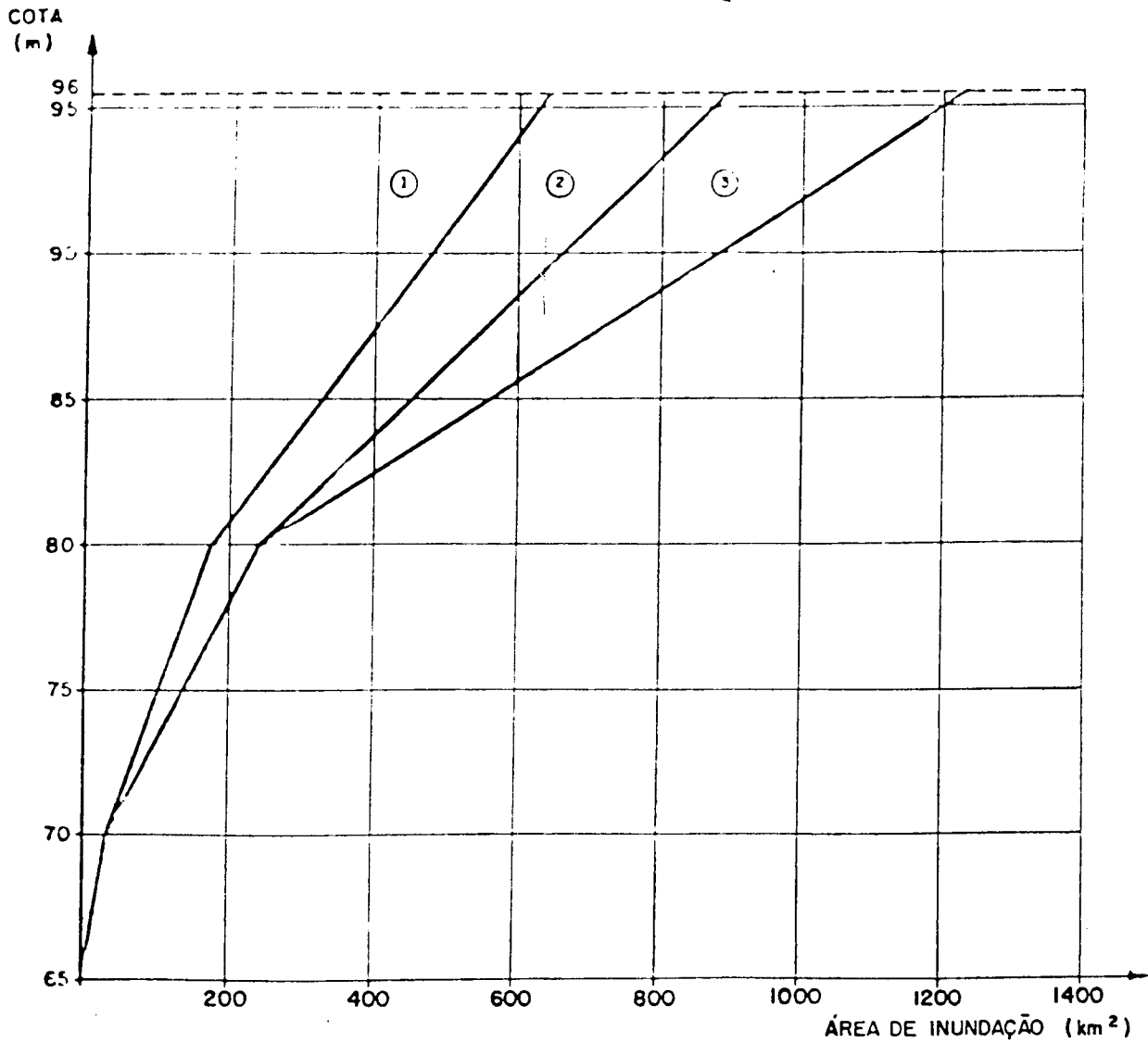
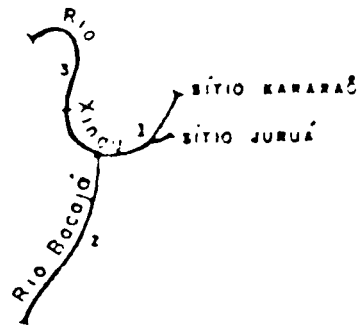
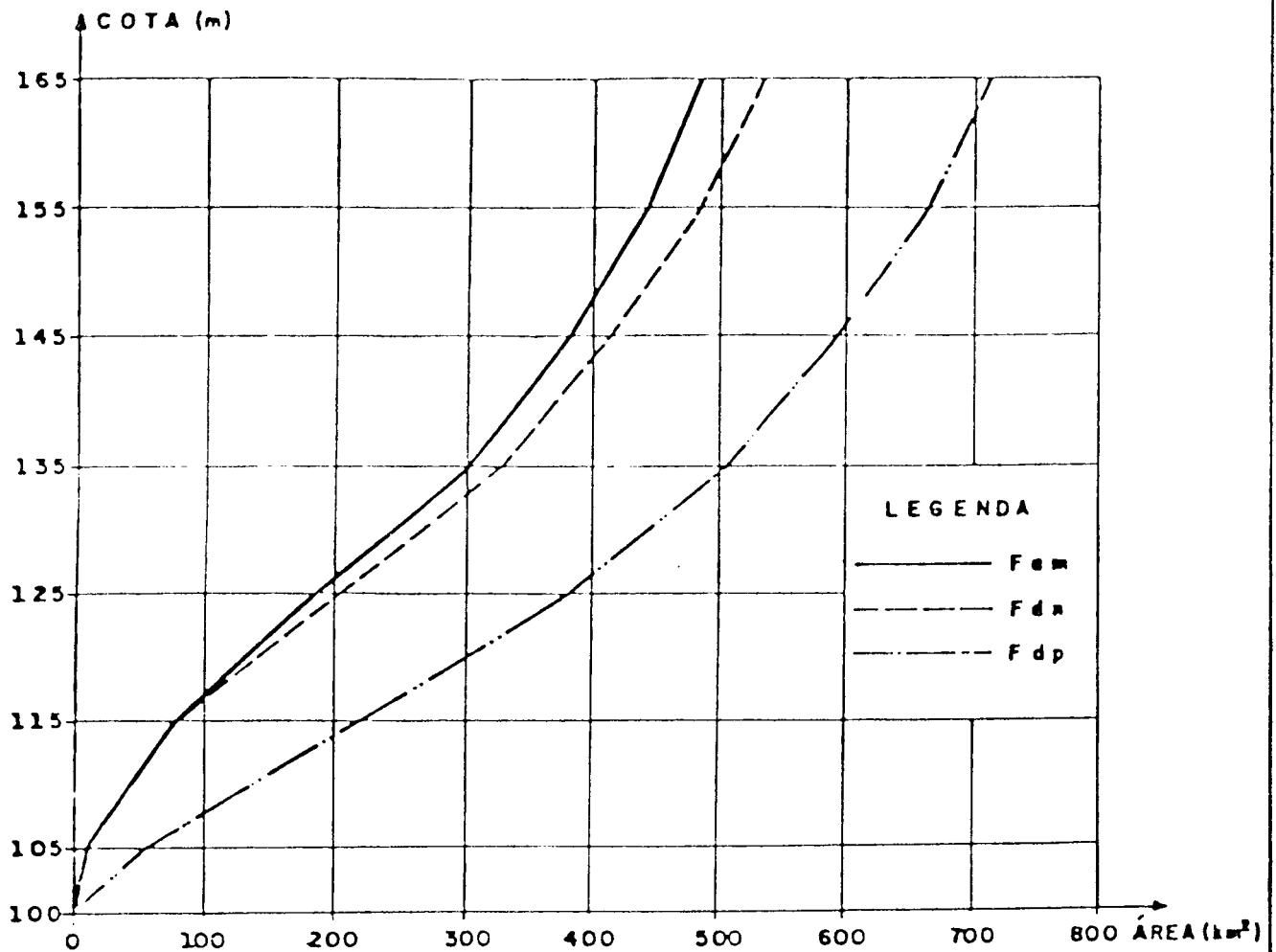


FIGURA 2

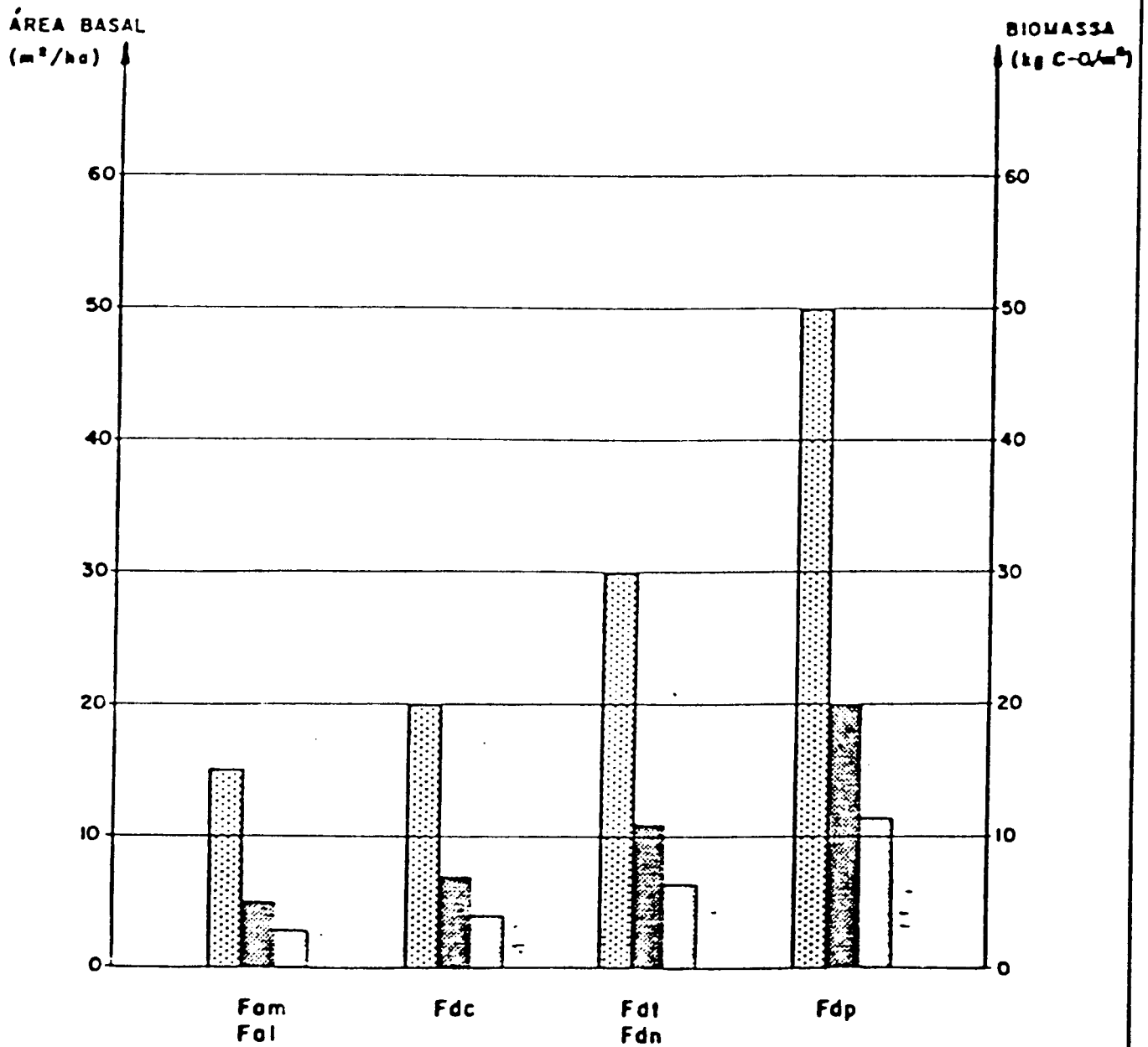
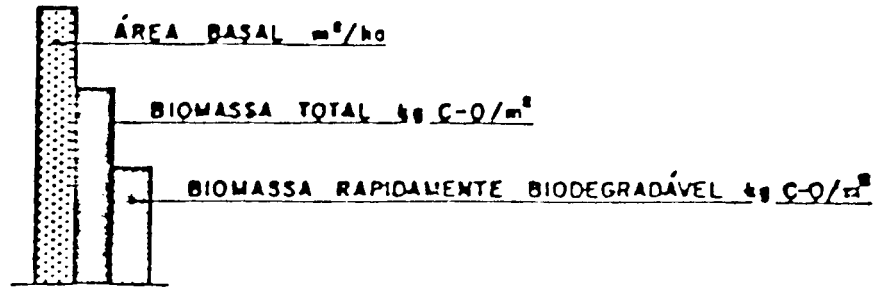
## CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO HOMOGÊNEA DOS TIPOS DE COBERTURA VEGETAL



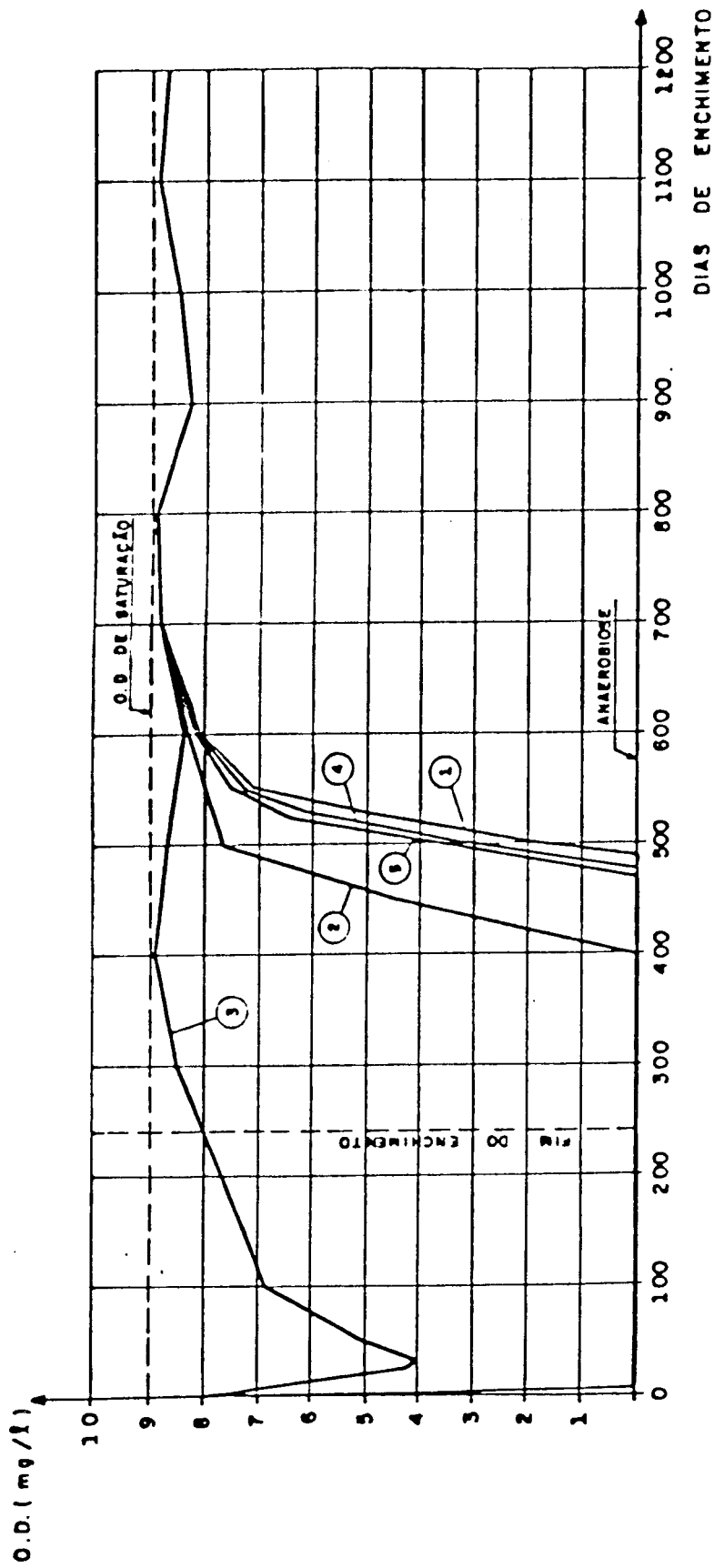
COTAS (m)	Fcm	Fdn	Fdp	TOTAL
100	0,00	0,00	0,00	0,00
105	9,38	0,00	47,24	56,62
115	77,43	0,00	141,71	219,14
125	186,27	13,72	179,50	381,49
135	304,00	22,86	179,50	506,36
145	382,03	32,01	179,50	593,54
155	443,77	41,15	179,50	664,38
165	481,61	50,30	179,50	711,40

QUANTIDADE MÉDIA DE BIOMASSA NOS  
DIFERENTES TIPOS DE VEGETAÇÃO

LEGENDA

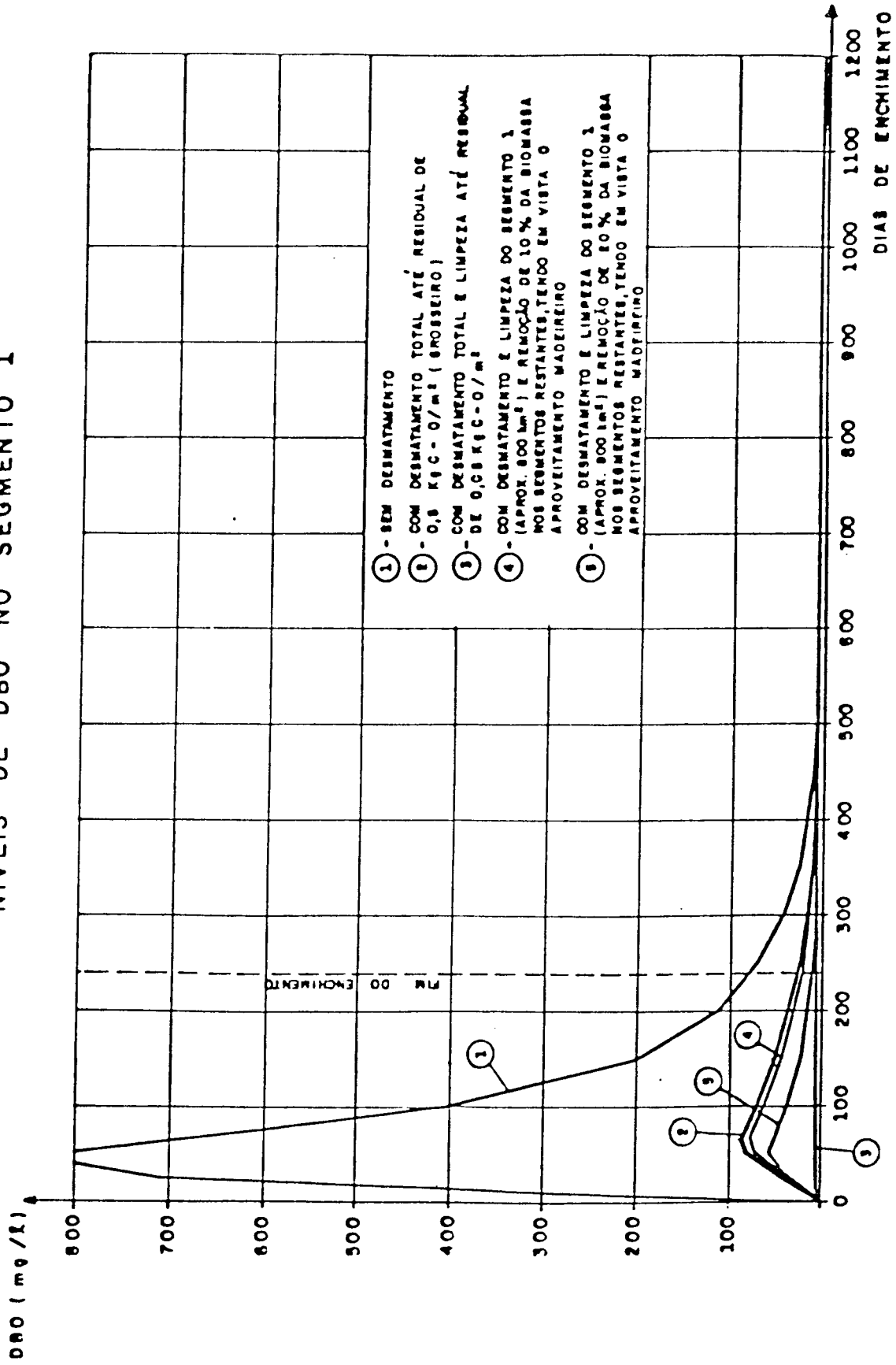


# NÍVEIS DE O.D. NO SEGMENTO 1

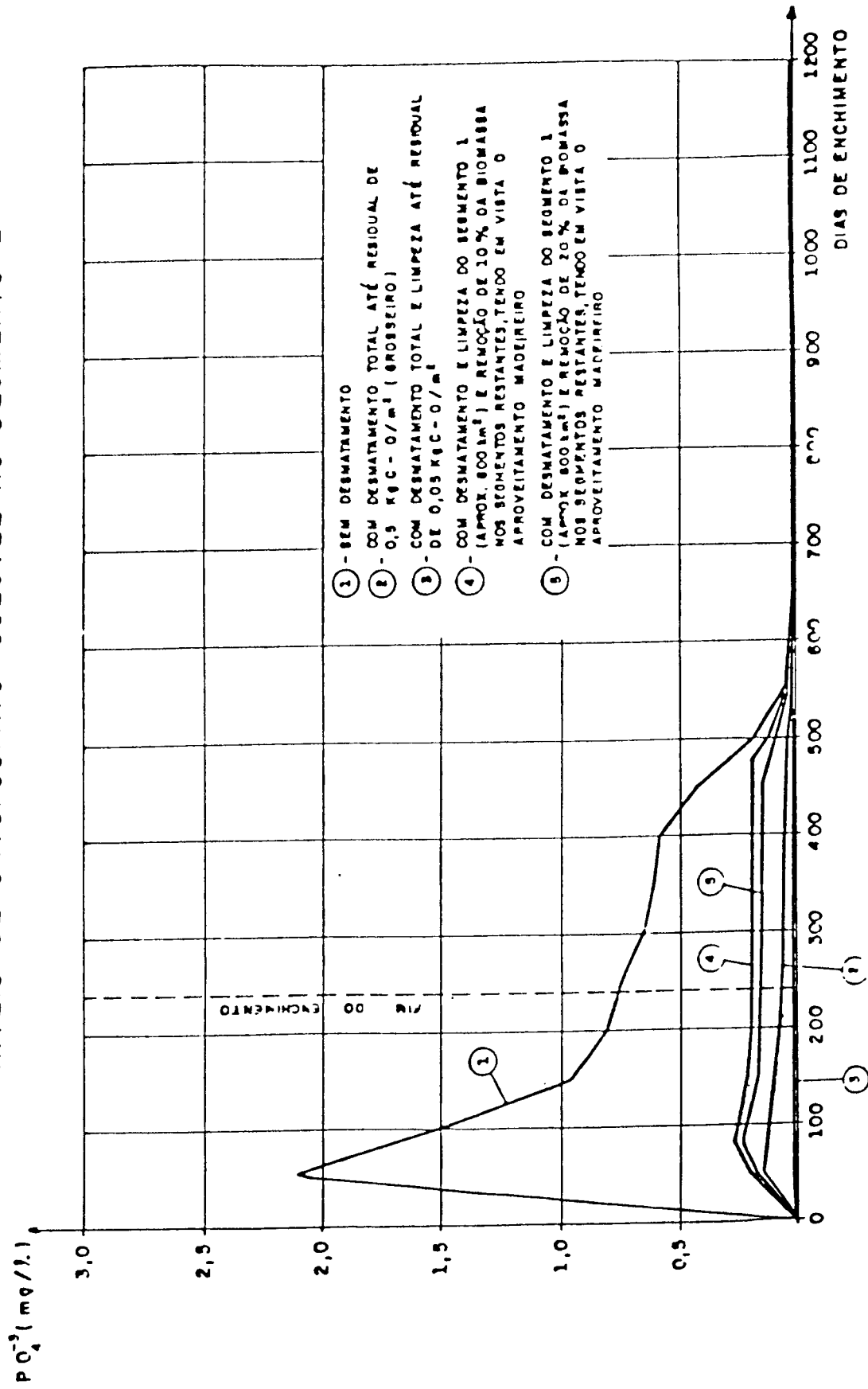


- ① - SEM DESATAMAMENTO
- ② - COM DESATAMAMENTO TOTAL ATÉ RESIDUAL DE 0,5 KGC-O/m³ (GROSSEIRO)
- ③ - COM DESATAMAMENTO TOTAL E LIMPEZA ATÉ RESIDUAL DE 0,05 KGC-O/m³
- ④ - COM DESATAMAMENTO E LIMPEZA DO SEGMENTO 1 (APROX. 800 km³) E REMOÇÃO DE 10% DA BIOMASSA NOS SEGMENTOS RESTANTES, TENDO EM VISTA O APROVEITAMENTO MADEIREIRO
- ⑤ - COM DESATAMAMENTO E LIMPEZA DO SEGMENTO 1 (APROX. 800 km³) E REMOÇÃO DE 20% DA BIOMASSA NOS SEGMENTOS RESTANTES, TENDO EM VISTA O APROVEITAMENTO MADEIREIRO

# NÍVEIS DE DBO NO SEGMENTO 1



# NÍVEIS DE ORTOFOSFATO SOLÚVEL NO SEGMENTO 1



# PRODUÇÃO TEÓRICA DE GASES DEVIDA A VEGETAÇÃO INUNDADA NO SEGMENTO 1

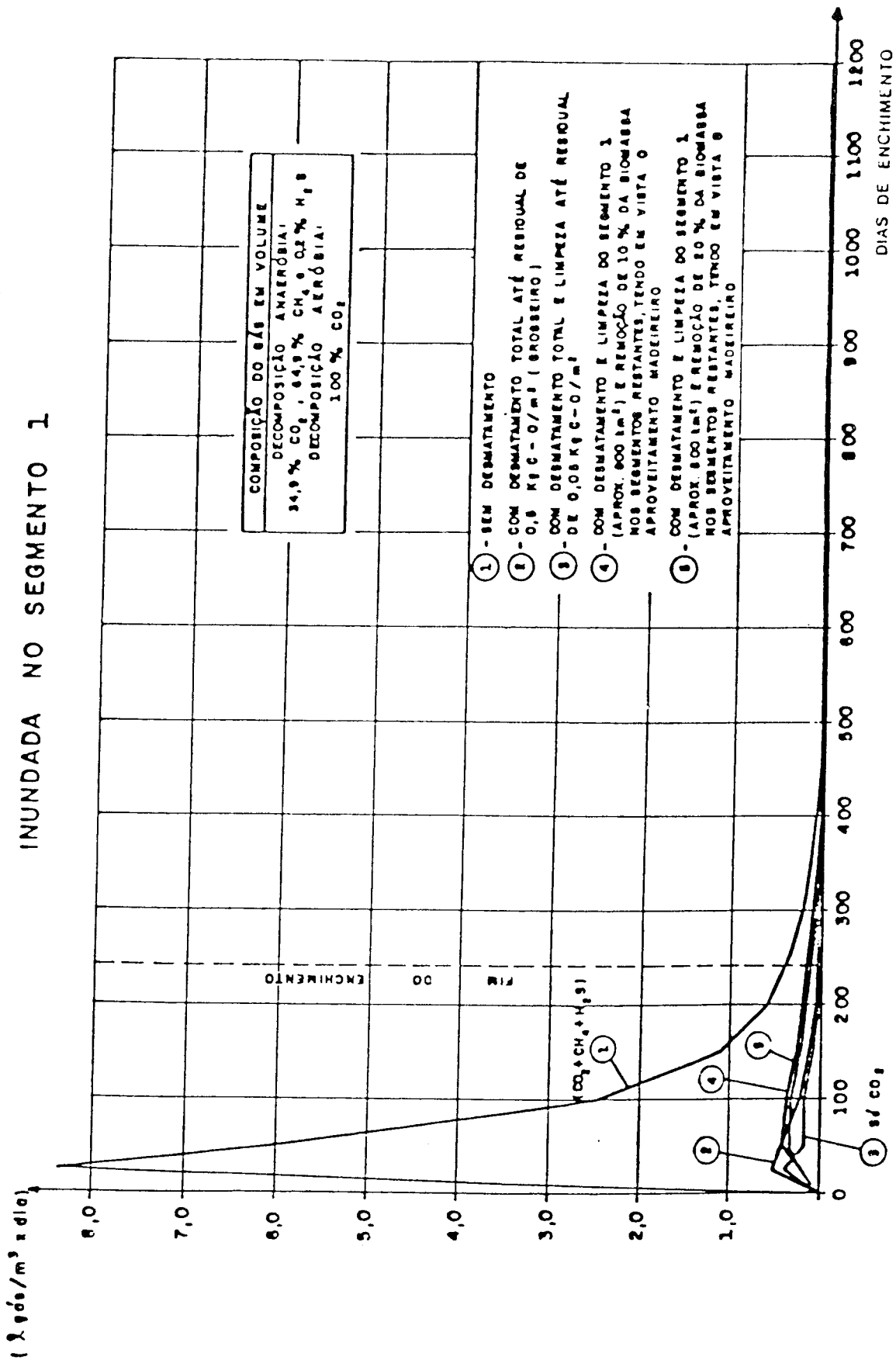


FIGURA 2



# CONCENTRAÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS DEVIDO À VEGETAÇÃO INUNDADA DO SEGMENTO 1

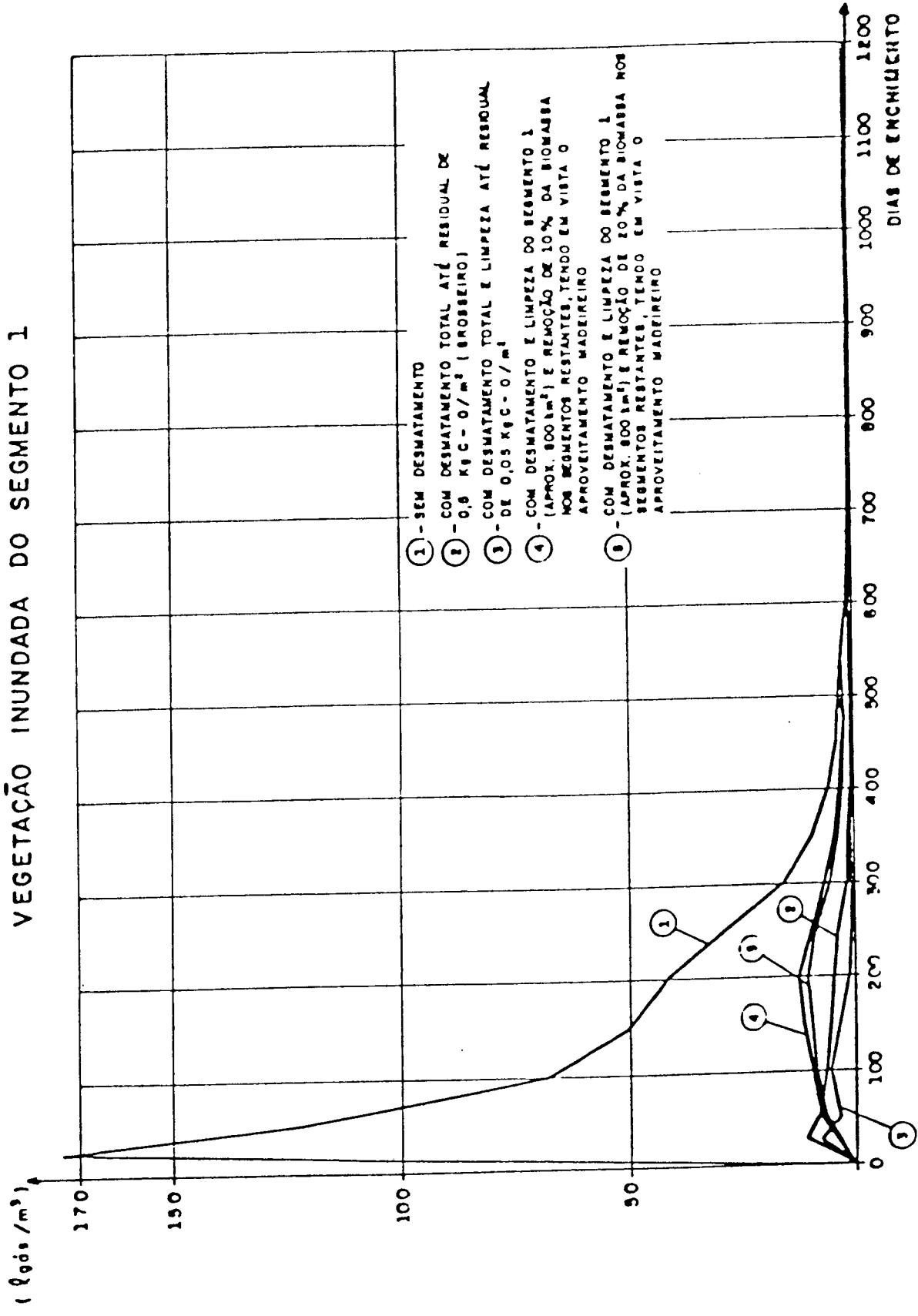
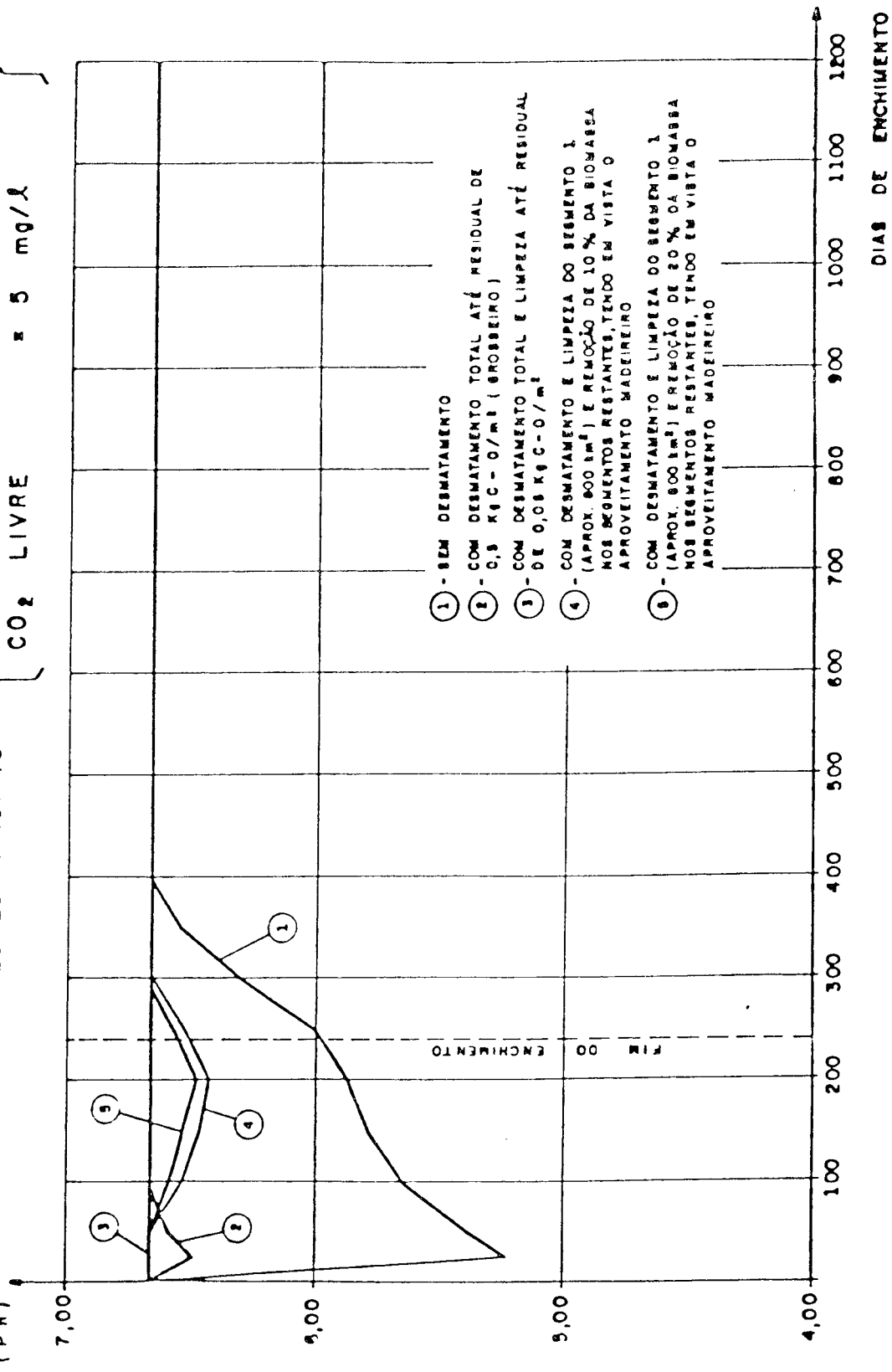


FIGURA 9

PREVISÃO DAS ALTERAÇÕES NO PH POR EFEITO DA VEGETAÇÃO INUNDADA NO SEGMENTO 1

COM BASE NOS VALORES INICIAIS : { ALCALINIDADE TOTAL = 12,5 mg/l  $\text{CaCO}_3$   
 $\text{CO}_2$  LIVRE = 5 mg/l



CRONOGRAMA DE DESMATAmento ATÉ A COTA 110 m - 1ª FASE

SETOR	VEGETAÇÃO																						
	TIPO	EXISTENTE (ha)	A SER DESMATA (ha)	1983						1984													
				MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	JANEIRO	FEBREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO					
1	MD	103,9	103,9	64,3	64,3	149																	
	MR	321,7	321,7		124,4	197,3																	
	O	636,3	636,3					190,8															
2	MD	30,8	30,8		30,3	12,3																	
	MR	603,0	603,0		142,1	134,3	134,3																
	O	1033,6	853,3																				
3	MD	13,7	13,7			13,7																	
	MR	122,9	122,9			122,9																	
	O	1170,6	937,6																				
4	MD	30,3	30,3			30,3																	
	MR	419,9	419,9			140,9	140,9																
	O	833,6	363,0																				
5	MD	64,0	64,0			32,0	32,0																
	MR	396,9	396,9			143,7	143,7																
	O	1675,9	1362,7																				
6	MD	55,6	55,6																				
	MR	183,7	183,7			133,7																	
	O	436,0	341,0																				
7	MD	9,1	9,1			9,1																	
	MR	781,2	781,2			27,7	133,3	133,3															
	O	680,0	—																				
TOTALS GENSIAIS	MD	406,4	406,4	84,3	123,0	40,9	67,3	61,3	34,4														
	MR	2694,7	2694,7	—	166,5	972,8	643,3	634,4	480,4														
	O	6643,3	4333,9	—	—	—	—	190,8	190,8	190,8	190,8	613,2	613,2	613,2	613,2	613,2	613,2	613,2	613,2	613,2	613,2	613,2	613,2
TOTAL	10004,4	6007,0	84,3	169,5	613,1	708,6	808,7	708,6	708,6	708,6	212,5	212,5	212,5	212,5	212,5	212,5	212,5	212,5	212,5	212,5	212,5	212,5	

# CURVAS REFERENCIAIS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS

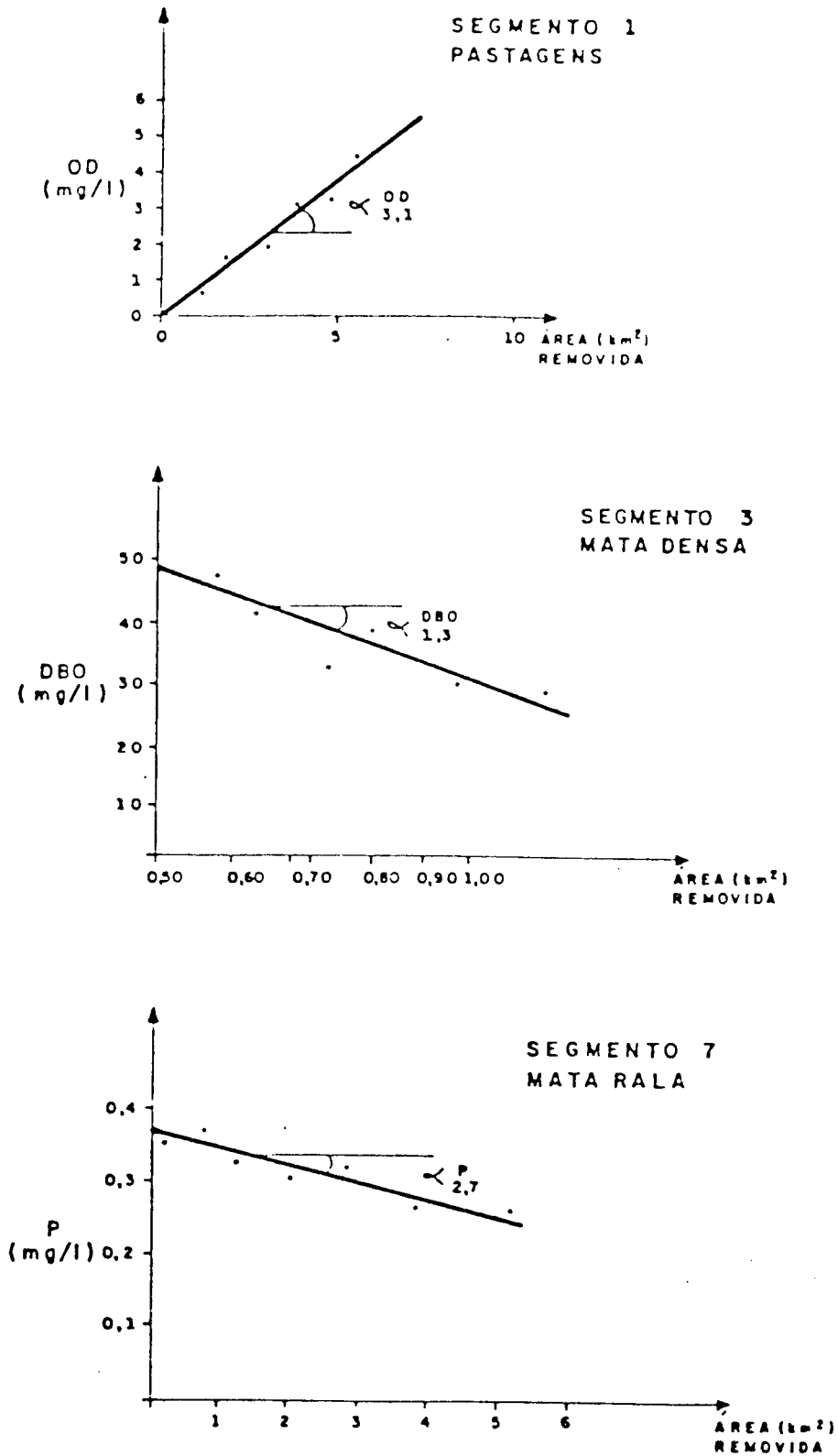


FIGURA 12



