



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UnICEUB
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

TAIRONE URCINO OLIVEIRA

**ESTIMATIVA REMOTA DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DO
RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO**

BRASÍLIA

2018



TAIRONE URCINO OLIVEIRA

**ESTIMATIVA REMOTA DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DO
RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica
apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e
Pesquisa.

Orientação: Dr. Bruno Collischonn

BRASÍLIA

2018

AGRADECIMENTO

A Deus, familiares e amigos minha gratidão, reverência e afeto. Meu agradecimento especial ao meu orientador Bruno Collischonn pelos seus ensinamentos e dedicação em todo o decorrer dessa pesquisa. Agradeço também ao CNPq, ao UniCEUB, a CAESB e a Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa por todo suporte e apoio. E a todos que de alguma forma contribuíram para que essa pesquisa fosse concretizada.

Espero que esse trabalho seja útil aos futuros pesquisadores, estudantes e profissionais que tenham interesse sobre o assunto.

*“Suba o primeiro degrau com fé.
Não é necessário que você veja toda a escada.
Apenas dê o primeiro passo!”*

Martin Luther King

ESTIMATIVA REMOTA DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO

Tairone Urcino Oliveira - UniCEUB, PIBITI/CNPq, aluno bolsista

taironeurcino@sempreceub.com

Bruno Collischonn – UniCEUB, professor orientador

bruno.collischonn@ceub.edu.br

O reservatório do Descoberto, principal manancial para abastecimento público de água do Distrito Federal sofreu grandes oscilações de níveis de água nos últimos dois anos em virtude da crise hídrica. A urbanização, a alteração do uso do solo na bacia hidrográfica e a possível deposição de sedimentos, levaram a dúvidas quanto a real capacidade de armazenamento hídrico do reservatório, uma vez que o último levantamento de sua capacidade foi realizado no ano de 2002. Neste estudo, propõe-se uma forma mais rápida e econômica de cubar reservatórios de regularização, por meio do sensoriamento remoto. A curva cota-área-volume pode ser obtida com base na integração da área do reservatório extraída de uma sequência de imagens de satélite com os dados de nível de água. Aplicou-se a técnica para o reservatório do Descoberto, e a curva resultante nesse estudo foi comparada com a curva obtida no último levantamento batimétrico, de forma a estimar o assoreamento no período. Comparou-se o resultado com uma estimativa teórica do assoreamento, obtida de métodos consagrados, como o uso conjunto do mapa de produção potencial de sedimentos e a curva de Brune. Os resultados mostram que não houve assoreamento expressivo no período, ao contrário do que o senso comum sugeria. Este resultado foi confirmado pelas estimativas teóricas realizadas, bem como por análises visuais em campo.

Palavras-Chave: Sensoriamento remoto. Curva cota-volume. Assoreamento.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do levantamento batimétrico	11
Figura 2: Esquema do levantamento aerofotogramétrico	13
Figura 3: Curva cota-área-volume do reservatório do Descoberto.....	14
Figura 4: Localização da área de estudo	17
Figura 5: Espectro de radiação eletromagnética.....	19
Figura 6: Etapas dos processamentos das imagens em ambiente de geoprocessamento	23
Figura 7: Mapa do potencial de produção de sedimentos	26
Figura 8: Comparativo entre área de lâmina de água em décadas diferentes.....	29
Figura 9: Vista aérea da barragem do Descoberto em 13/10/2017.....	31
Figura 10: Representação dos pontos visitados.....	31
Figura 11: Confluência do Rio Descoberto.....	32
Figura 12: Confluência do Ribeirão das Pedras e despejo de galeria pluviais	32
Figura 13: Confluência do Ribeirão do Rodeador.....	33

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1: Métodos utilizados em levantamentos batimétricos	12
Quadro 2: Descrições dos satélites utilizados	22

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de Brune	25
Gráfico 2: Regressão entre a área inundada e nível d'água.....	27
Gráfico 3: Curva cota – volume	28

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

ADASA	- Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do DF
ANA	- Agência Nacional de Águas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	- Área de Proteção Ambiental
CAESB	- Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
DF	- Distrito Federal
DGPS	- Differential Global Positioning System
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LIDAR	- Light Detection and Ranging
MIR	- Infravermelho Médio
MNDWI	- Índice Modificado de Diferença Normalizada da Água
USGS	- Sítio do Serviço Geológico dos Estados Unidos
cm	- Centímetro
hm³	- Hectômetro Cúbico
km²	- Quilômetro Quadrado
m	- Metro
m³	- Metro Cúbico
s	- Segundo
t	- Tonelada
%	- Porcentagem

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	9
2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1- CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE RESERVATÓRIOS E AS TÉCNICAS DE BATIMETRIA.....	10
2.2- PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E OS PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS EM RESERVATÓRIOS	14
2.3- BACIA HIDROGRÁFICA E O RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO	16
2.4- SENSORIAMENTO REMOTO E SEU USO EM HIDROLOGIA.....	18
3- METODOLOGIA.....	20
3.1- CONCEPÇÃO GERAL	20
3.2- ÁREA INUNDADA	21
3.2.1- PROCESSAMENTO DAS IMAGENS COM USO DE FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO.....	22
3.3- DADOS DE NÍVEL D'ÁGUA.....	23
3.4- INTERVALOS DE CONFIANÇA.....	23
3.5- AVALIAÇÃO TEÓRICA DO ASSOREAMENTO	24
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1- CURVAS COTA – ÁREA E COTA – VOLUME RESULTANTES.....	27
4.2- ESTIMATIVA TEÓRICA DO ASSOREAMENTO.....	30
4.3- VALIDAÇÃO EM CAMPO	30
4.4- VALIDAÇÃO JUNTO À CAESB.....	33
5- CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS	36
APÊNDICES.....	38

1- INTRODUÇÃO

O reservatório do Descoberto, situado no rio de mesmo nome, é o principal manancial para abastecimento público de água do Distrito Federal (DF), capaz de atender aproximadamente 1,5 milhão de pessoas (CAESB, 2014). No fim do ano de 2016, o baixo armazenamento de água nesse reservatório fez com que a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) e os órgãos de recursos hídricos, tomassem uma série de medidas para superação da crise hídrica, chegando a ser estabelecido um rodízio de abastecimento.

Os processos hidrossedimentológicos que ocorrem na bacia hidrográfica a médio e longo prazo tendem a carrear material sólido para o reservatório, desencadeando o processo de sedimentação devido à diminuição da velocidade do fluxo no ambiente, provocando o assoreamento (CARVALHO 2008).

Além disso, a mudança do uso do solo na bacia hidrográfica, o aumento da urbanização e o aumento da erosão do solo podem potencializar a ocorrência do assoreamento do reservatório, acarretando na redução de sua capacidade de armazenamento de água.

A estimativa da capacidade de armazenamento de reservatórios existentes é realizada por meio de levantamento batimétrico, para a componente aquática e aerofotogrametria ou técnica similar, para a componente terrestre. Uma vez determinada a capacidade de armazenamento, o acompanhamento diário do volume armazenado é feito de forma indireta, por meio da leitura diária em réguas instaladas na margem do reservatório, e a conversão destes níveis em volume é realizado por meio da curva cota-área-volume.

Entretanto, esses levantamentos são relativamente demorados e onerosos, de forma que essa estimativa não é feita com a devida periodicidade. No caso do reservatório do Descoberto, o levantamento mais recente foi do ano de 2002 apurando uma capacidade máxima de armazenamento de 86 hm³. Na época da construção do reservatório, na década de 70, a capacidade de armazenamento era estimada em 102,3 hm³; portanto houve, em menos de 30 anos, um decréscimo de 17% no volume de água disponível (MAGNA, 2002).

Por outro lado, o sensoriamento remoto é uma ferramenta que tem sido crescentemente usada na quantificação de variáveis associadas à hidrologia. Uma possibilidade aberta pelo grande número de satélites atualmente disponíveis é estimar o

volume armazenado em reservatórios, por meio da integração de dados de área inundada com níveis de água de maneira mais rápida e econômica do que pela batimetria convencional.

Deste modo, a pesquisa se justifica na medida em que a capacidade de armazenamento de um reservatório é uma informação que é raramente medida diretamente, a despeito de sua importância para o adequado gerenciamento do estoque de recursos hídricos disponíveis.

Assim, as técnicas de sensoriamento remoto podem oferecer uma estimativa confiável na atualização desses levantamentos, permitindo uma avaliação mais frequente da capacidade de armazenamento de um reservatório, por meio de uma metodologia alternativa.

Portanto, esta pesquisa tem por objetivo estimar a capacidade atual de armazenamento de água do reservatório do Descoberto, por meio de imagens de satélites, considerando as incertezas associadas à estimativa, de modo a avaliar as condições do assoreamento. Além disso, será possível comparar os resultados com modelos de erosão e sedimentação e ainda avaliar o impacto da redução do volume no potencial de regularização do reservatório.

2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1- Capacidade de armazenamento de reservatórios e as técnicas de batimetria

A capacidade de armazenamento de um reservatório consiste no volume de água que é capaz de armazenar, quando cheio, tendo seu volume útil compreendido entre os níveis d'água mínimo e máximo operacional. Essa capacidade é basicamente dada pela topografia da área inundada pelo reservatório (LOPES e SANTOS, 2002).

Em fase de projeto, quando o reservatório ainda não existe, o levantamento da capacidade de armazenamento é feito por meio de levantamento topográfico da área a ser inundada, e eventualmente a batimetria do leito do rio. Ao longo da vida útil do reservatório a capacidade tende a se alterar devido a modificações antrópicas, como um eventual aterro das margens e principalmente devido aos processos hidrossedimentológicos da bacia, que tendem a depositar material sólido no fundo do manancial, diminuindo sua capacidade (CARVALHO et al., 2000).

Deste modo, é necessário atualizar o levantamento da capacidade de armazenamento com certa constância, para evitar possíveis superestimativas do estoque de água disponível. A frequência desejável para atualização dos levantamentos topo-batimétricos para reservatórios de grande porte (maior que 100 m^3), como é caso do Descoberto, seja a cada 10 anos (CARVALHO et al., 2000).

Os procedimentos gerais para levantamentos de reservatórios têm mudado com o avanço científico e com o surgimento de novas tecnologias e equipamentos. A seleção do método depende da disponibilidade e condições do mapeamento prévio, dos objetivos de estudo, do tamanho do reservatório e do grau de precisão desejado (BRUK, 1985; CARVALHO et al., 2000).

Para reservatórios existentes, o levantamento da capacidade de armazenamento convencionalmente é dividido em duas componentes, a aquática e a terrestre. Isto em virtude de o nível d'água do reservatório em geral ser variável ao longo do tempo, e dificilmente o manancial está cheio no momento do levantamento (MOLLE e CADIER, 1992).

A componente aquática corresponde à quantificação do volume abaixo do nível d'água atual, e em geral é feita por meio de batimetria: a partir de uma embarcação, a profundidade do manancial é medida em diversos pontos, distribuídos em seções transversais, como indicado na figura 1 (HERITAGE e LARGE, 2009).

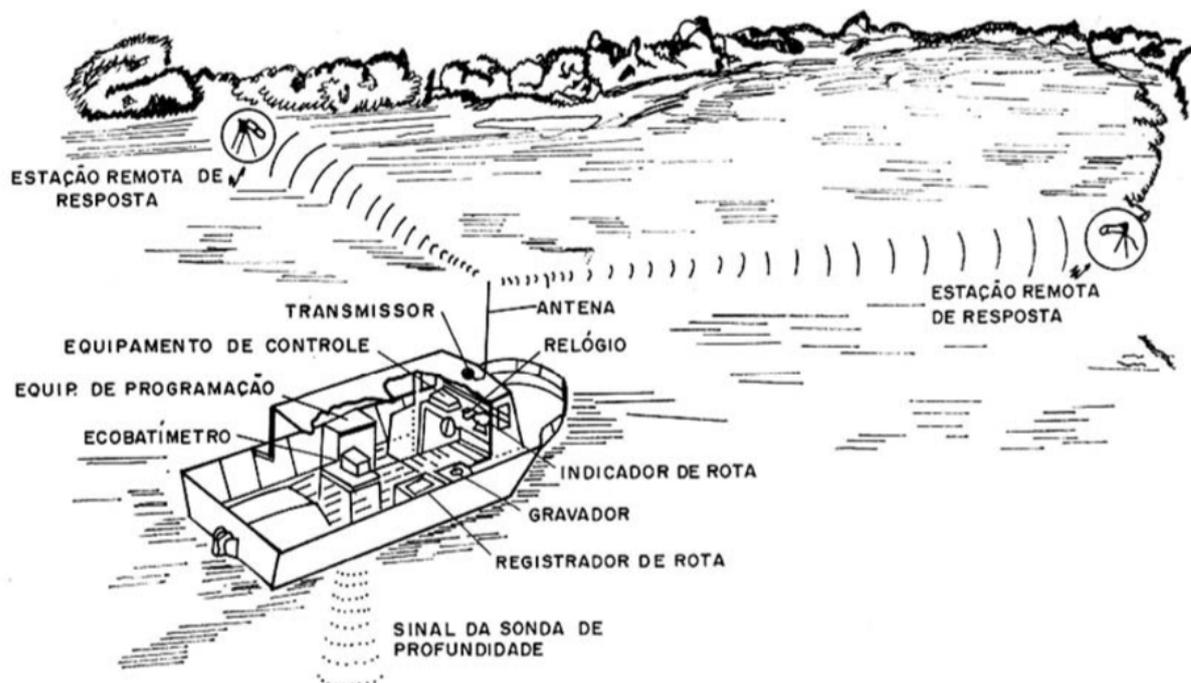


Figura 1: Esquema do levantamento batimétrico

Fonte: BRUK, 1985

O quadro 1 demonstra alguns métodos para realização do levantamento batimétrico.

Quadro 1: Métodos utilizados em levantamentos batimétricos

Método		Utilização	Observação
Medida da distância	Medida da profundidade		
Trena	Régua, escala graduada	Rios ou braços de lagos estreitos e rasos	Medição a vau ou até 2m
Cabo de aço	Sonda ou lastro	Rios ou braços de lagos rasos ou profundos, larguras até 300m	Medição a vau ou canoa
Sextante	Sonda ou ecobatímetro de leitura direta	Rios ou braços de lagos rasos ou profundos, larguras até 2km	Instalar linha básica na margem de tal forma a que sejam lidos ângulos maiores que 30°
Teodolitos (2 ou 3)	Ecobatímetro digital ou analógico	Rios ou braços de lagos rasos ou profundos, larguras até 2km	Instalar linha topográfica básica na margem de tal forma a que sejam lidos ângulos maiores que 30°
Distanciômetro ou Estação total	Ecobatímetro digital ou analógico	Seções transversais até 10km de largura	Pode ser gravado em meio magnético para uso em plotter
Sistema eletrônico de posicionamento Trisponder ou Motorola	Ecobatímetro digital ou analógico	Seções transversais até 50km	Gravado em meio magnético para uso em plotter
DGPS	Ecobatímetro digital	Seções transversais e distâncias até 50km	Gravado em meio magnético para uso em plotter
Equipamento multi-feixe (<i>towfish</i>) e posicionamento	Geofísica (<i>side scan sonar</i>)	Varredura vertical e lateral	Permite o levantamento vertical e lateral do leito e também das camadas depositadas

Fonte: CARVALHO et al., 2000

O método a ser utilizado depende da largura da seção a levantar, da profundidade, do porte do reservatório, dos recursos disponíveis e de outros fatores. Em geral são utilizados os ecobatímetros ou equipamentos acústicos para medir a profundidade, e o volume é obtido por integração dessa profundidade ao longo da área inundada.

No entanto é possível que a utilização destes sistemas seja capaz de configurar uma limitação espacial, uma vez que a distribuição de pontos, linhas ou perfis, são normalmente equiespaçadas de algumas dezenas de metros, o que gera uma densidade de dados eventualmente insuficiente para a real e efetiva caracterização da morfologia do reservatório.

Dessa forma, a determinação da sua real capacidade de armazenamento se torna comprometida devido à baixa densidade de dados. E no caso de aumentar a densidade de

dados é capaz de tornar o projeto inviável sob o ponto de vista econômico (CARVALHO et al., 2000; SOUSA et al., 2015).

Já a componente terrestre normalmente é obtida por meio de aerofotogrametria: uma sucessão de fotos sobrepostas da área, obtidas a partir de um avião ou drone, permitindo que a altitude de cada ponto no terreno seja estimada, por meio de técnicas de estereoscópica, ou seja, projeções de fotografias que dão à imagem plana a impressão de relevo. Posteriormente, é possível gerar um modelo de elevação, e conseqüentemente estimar o volume abaixo de um determinado nível. Tal levantamento pode ser observado na figura 2.

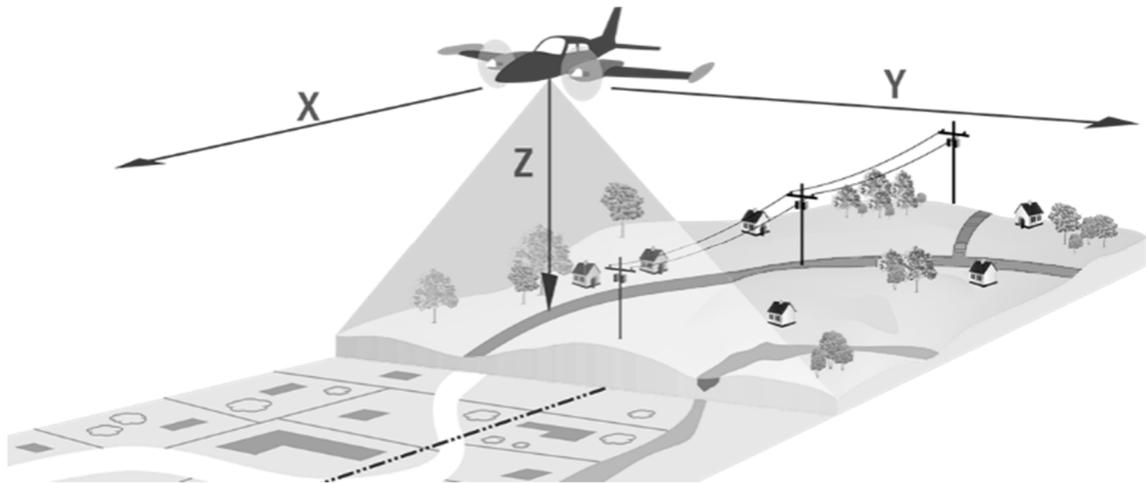


Figura 2: Esquema do levantamento aerofotogramétrico

Fonte: https://fotos.habitissimo.com.br/foto/aerofotogrametria_1740597

Recentemente, a componente terrestre passou a ser medida também por aparelhos de laser, como o LIDAR (*Light Detection and Ranging*), que utiliza um emissor de ondas *laser* a bordo de um avião e estima a altitude do terreno com base no tempo de resposta da onda refletida, acoplado a sistemas de navegação de precisão (HERITAGE e LARGE, 2009).

Nesse contexto, por exigir uma mobilização de pessoal e equipamentos, o procedimento de levantamento da capacidade de armazenamento é relativamente custoso e demorado. Collischonn e Clarke (2016) elencaram uma série de fatores que influenciam o custo de levantamentos como esse, que varia entre R\$ 1200 e R\$ 4400 por hectômetro cúbico (hm^3 ou 10^6 m^3). A logística, o custo e o tempo tornam inviáveis o levantamento frequente do volume de reservatórios.

Assim, para permitir a avaliação diária do volume armazenado em reservatórios, lança-se mão da chamada curva cota-área-volume, que é obtida a partir dos levantamentos mencionados. Essa curva relaciona para cada nível d'água do reservatório, o correspondente volume e a área inundada. Com isso, basta ler o nível d'água por meio de uma série de régua

instaladas na margem do reservatório, e obter o correspondente volume, assim como a área inundada.

Do mesmo modo que a capacidade de armazenamento, a curva cota-área-volume também é afetada pelo assoreamento. Em geral, com o passar do tempo a um mesmo nível d'água, passa a corresponder um menor volume armazenado. A figura 3 indica a curva cota-área-volume do reservatório do Descoberto.

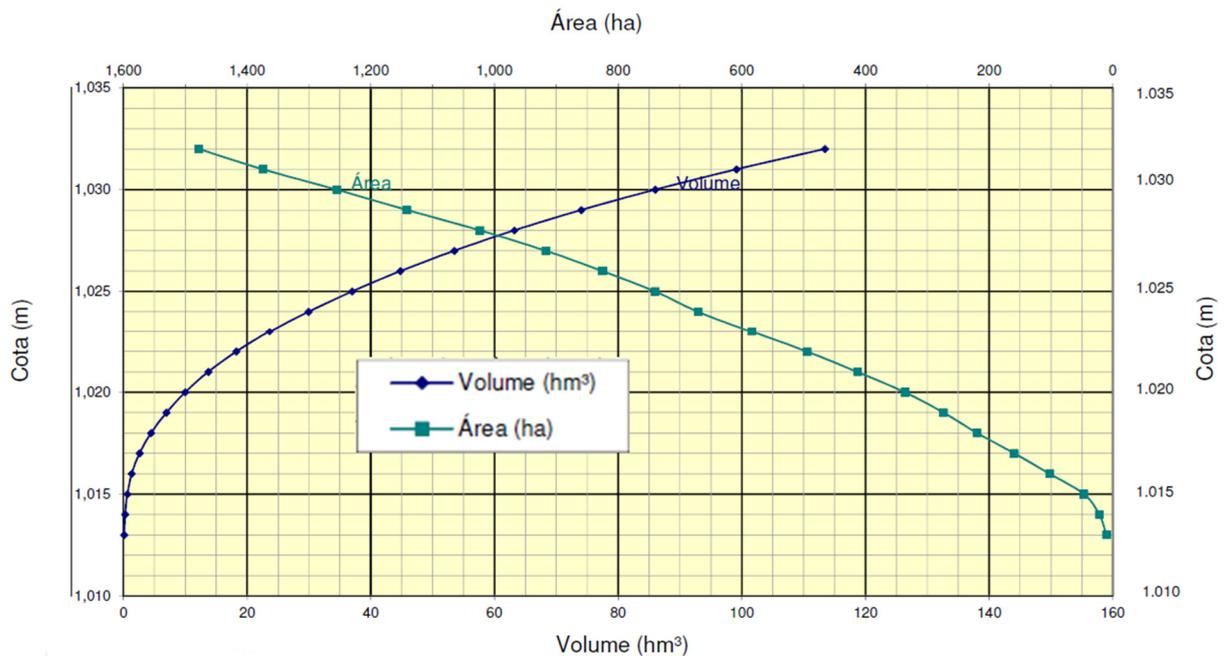


Figura 3: Curva cota-área-volume do reservatório do Descoberto

Fonte: MAGMA, 2002

2.2- Produção de sedimentos e os processos hidrossedimentológicos em reservatórios

A erosão hídrica é o processo de mobilização de partículas de solo por meio da ação da água da chuva sobre a superfície. A gota de chuva, ao impactar no terreno, provoca desagregação dos torrões de solo. Este processo é acelerado caso não haja adequada cobertura vegetal, uma vez que as folhas amortecem o impacto das gotas e diminuem a velocidade do escoamento sobre o solo. O tipo de solo também influencia, visto que os solos argilosos têm maior coesão e, portanto, menor propensão à desagregação.

Posteriormente, o escoamento superficial culmina no carreamento do material desagregado para zonas mais baixas do terreno, seja de forma difusa ou por meio de sulcos, que podem evoluir para as chamadas voçorocas. Ao fim, o material é carreado até um córrego ou rio (POLETO, 2008).

Enquanto o rio possuir velocidade suficiente a energia cinética do fluxo sustenta o transporte dos sedimentos em suspensão ou por arraste. No entanto, caso ocorra uma diminuição da velocidade, por uma mudança na geometria do manancial por exemplo, a energia cinética pode não ser mais suficiente, causando a sedimentação do material (CARVALHO et al., 2000).

A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório normalmente provocam esses tipos de modificações, no qual as baixas velocidades da corrente possibilitam o depósito de partículas ocasionando o fenômeno do assoreamento (CARVALHO, 2008).

Porém, ainda assim, parte do material em particular as partículas mais finas, podem ser descarregadas por meio das estruturas de extravasamento e retirada de água (vertedores, turbinas, descargas de fundo ou bombas).

À medida que o assoreamento se intensifica também aumenta a velocidade do fluxo de água, em virtude da diminuição da seção transversal, o que diminui a taxa de sedimentação. Em algum ponto este processo alcança um equilíbrio hidrossedimentológico, quando a descarga sólida descarregada pelo reservatório é igual à descarga afluenta (CARVALHO et al., 2000).

As retenções de sedimentos nos reservatórios promovem a limpeza da água para seus diversos usos, embora a sedimentação contínua possa vir a impedir a operação do aproveitamento do reservatório. Assim, é necessária a quantificação do assoreamento e a verificação da vida útil do reservatório, isto é, o tempo em que a barragem pode vir a perder as suas funções (CARVALHO, 2008).

A quantificação dos processos de erosão e sedimentação é dotada de grandes incertezas. Existem em funcionamento no Brasil algumas estações de monitoramento sedimentométrico, que basicamente realizam medições de concentração de sedimentos em rios, assim como a medição de vazões. Deste modo, é possível estimar a descarga de sedimentos, por meio da chamada curva-chave de sedimentos, que basicamente correlaciona a vazão líquida e a concentração sólida, e conseqüentemente a descarga sólida. Esta abordagem é criticada por vários autores, tendo em vista que não necessariamente as vazões mais altas têm maiores concentrações e vice-versa.

Concomitantemente, nem todos reservatórios têm o mesmo comportamento quanto a formação do assoreamento. A geometria do lago, a topografia, a drenagem e a granulometria dos sedimentos são alguns fatores que podem intensificar a ocorrência do

processo, necessitando desta forma, de uma avaliação criteriosa e validações em campo (CARVALHO, 2008).

No cenário brasileiro, cabe destacar o trabalho da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) descrito em Campanholi (2006), que produziu um mapa de potencial de produção de sedimentos para todo país, com foco em assoreamento de hidrelétricas. Este trabalho frequentemente é adotado como uma referência para estudos hidrossedimentológicos.

Há também alguns modelos que se dedicam a estimar a taxa de sedimentação em reservatórios, sendo o mais conhecido deles o método de Brune. Basicamente este modelo propõe uma eficiência de retenção do reservatório, em função do seu tempo de residência (tempo médio de permanência da água em seu interior), o qual pode ser calculado a partir do volume armazenado e da vazão afluente média (BRUNE E GUNAR, 1953).

2.3- Bacia hidrográfica e o reservatório do Descoberto

A barragem do Descoberto está localizada no alto curso do Rio Descoberto, pertencente à bacia do Rio Paraná, e recebe a contribuição de uma área de drenagem de aproximadamente 433 km². O reservatório abastece o principal sistema de produção de água do Distrito Federal, responsável por 58,89% da água produzida e pelo atendimento de 61,52% da população do Distrito Federal (CAESB, 2014).

O último levantamento batimétrico foi realizado no ano de 2002, por meio do uso de um ecobatímetro capaz de fornecer registros detalhados da topografia do leito. O posicionamento foi determinado por meio de DGPS (*Differential Global Positioning System*) e GPS geodésico (MAGNA, 2002).

O levantamento batimétrico constatou que o volume máximo de acumulação na cota 1030 (nível do vertedouro) foi de 86 hm³, relativo a uma área inundada de 12,55 km². O processo foi realizado em seções paralelas perpendiculares ao eixo longitudinal do reservatório, afastadas entre si de 100 metros e com pontos a cada 40 metros (MAGNA, 2002).

O reservatório possui um volume útil de 76,02 hm³ e um o volume morto de aproximadamente 9,97 hm³. A altitude do ponto mais profundo do reservatório encontra-se aproximadamente na cota 1008 e a cota mínima operacional da barragem corresponde a altitude 1021 metros.

A bacia hidrográfica do reservatório do Descoberto localiza-se na porção oeste do Distrito Federal e é formada pelo represamento de vários cursos de água, sendo os principais:

Rio Descoberto, Ribeirão das Pedras, Ribeirão Rodeado, como apresentado na figura 4 (SANTOS E COSTA, 2015).

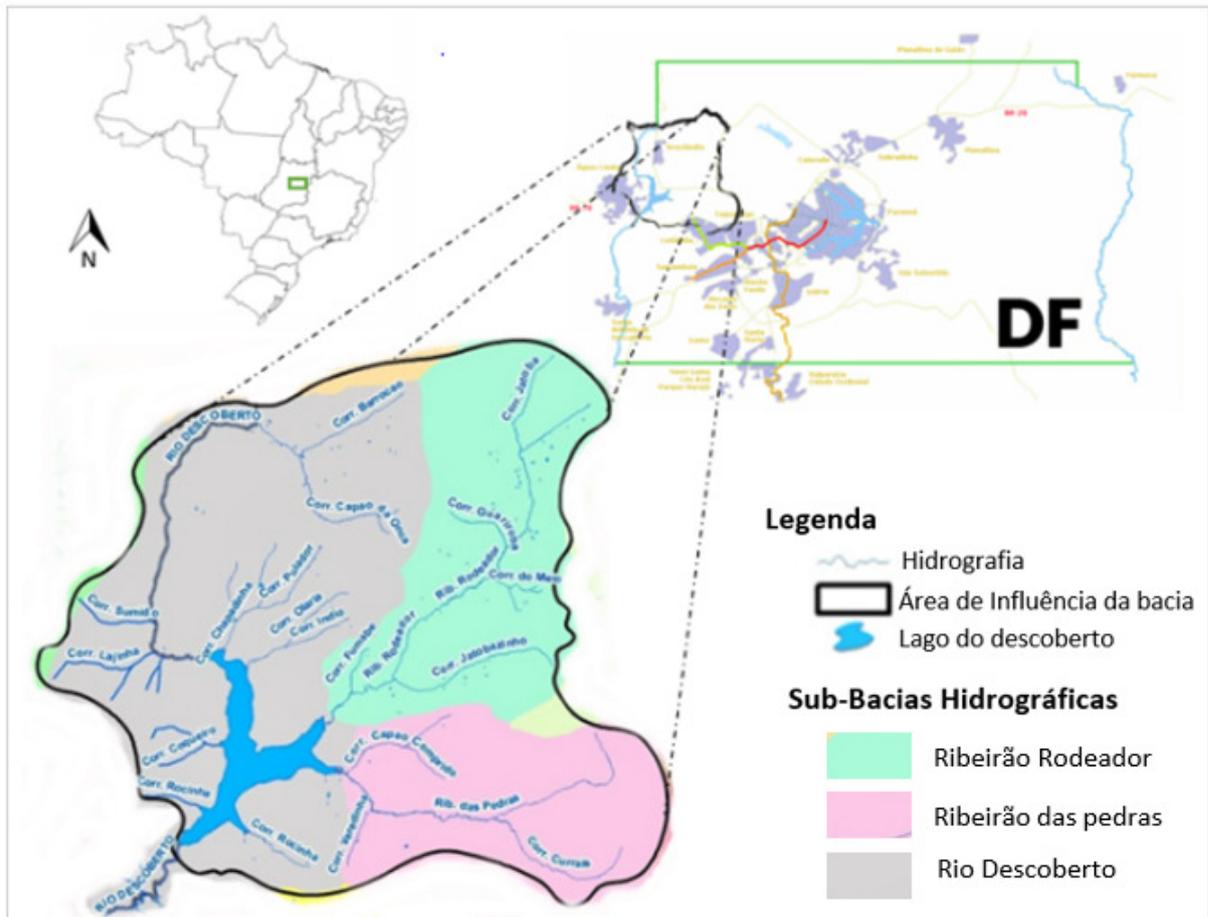


Figura 4: Localização da área de estudo

Fonte: Autor, 2018

Apesar de pertencer a uma Área de Proteção Ambiental (APA), a bacia hidrográfica do rio Descoberto tem sofrido alterações, sem que as medidas necessárias sejam tomadas para a manutenção da preservação do solo. O surgimento de parcelamentos, assentamentos, loteamentos, condomínios, invasões e da prática de agricultura e pecuária são exemplos dessas alterações (BICALHO, 2006).

O crescimento de núcleos urbanos como Brazlândia e partes de Ceilândia, Taguatinga e Águas Lindas de Goiás tem modificado o uso do solo na bacia, o que tende a impactar os processos hidrossedimentológicos (SANTOS e COSTA, 2015).

O ano 2017 foi marcado por registrar níveis extremamente baixos nos reservatórios que abastecem o Distrito Federal. Para minimizar os efeitos da estiagem, a CAESB implantou um plano de rodízio de abastecimento atingindo as cidades abastecidas pelos Sistemas

Descoberto e Santa Maria/Torto. O rodízio começou no dia 16/01/2017 no Sistema Descoberto e no dia 27/02/2017 no Sistema Santa Maria/ Torto, o segundo maior da Capital. No final deste ano o Descoberto registrou o nível mais baixo de sua história, apurando apenas 5,2% de sua capacidade (CAESB 2015).

O racionamento de água perdurou por 17 meses, e encerrou em 13/06/2018 em ambos os sistemas. As medidas adotadas pelos órgãos de recursos hídricos, o retorno do período chuvoso, juntamente com a economia e conscientização da população, possibilitaram a recuperação dos reservatórios. Em 15/05/2018 o Descoberto alcançou 91,9% de sua capacidade de armazenamento, marcando o segundo ano consecutivo em que não atingiu a sua capacidade máxima (ADASA, 2018).

2.4- Sensoriamento remoto e seu uso em hidrologia

O uso de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento em apoio aos estudos hidrológicos já se tornou comum nos últimos anos. Imagens orbitais e aerotransportadas são corriqueiramente utilizadas, com base em seus valores de reflectância da água, para mapeamento e delineamento de corpos d'água (BORGES et al, 2015).

A utilização de imagens orbitais para realização destes estudos, possibilita a diminuição dos custos envolvidos, maior rapidez e constância no acesso aos dados. Além disso, permite uma avaliação espacial ampla, analisando com maior precisão e detalhamento as relações entre os corpos de água e os outros elementos presentes na região ou bacia hidrográfica estudada (BORGES et al, 2015).

A grandeza usualmente medida por instrumentos de sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética. A principal fonte dessa radiação é o sol, que emite radiação em comprimentos de onda que podem variar de 10^{-2} a 10^4 metros. Este intervalo de variação do comprimento de onda pode ser considerado contínuo, constituindo o chamado espectro eletromagnético. Aproximadamente 44%, se dá em comprimentos de onda que podem ser identificados pelo olho humano, a chamada luz visível, apresentada na figura 5 (COLLISCHONN, 2006).

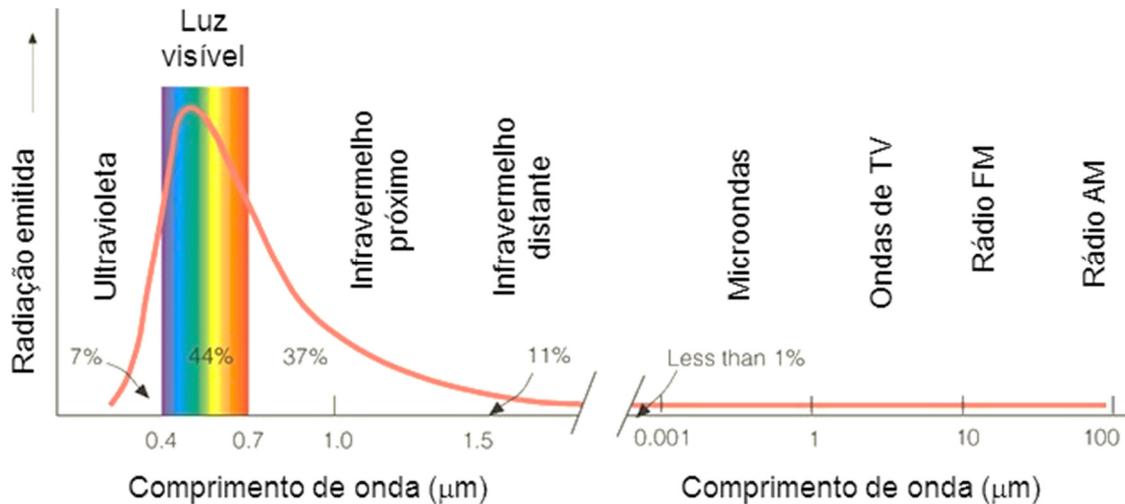


Figura 5: Espectro de radiação eletromagnética

Fonte: MOREIRA, 2003, adaptado

Ao incidir sobre um alvo na superfície terrestre, a radiação sofre absorção ou reflexão. Parte da energia absorvida pode ser reemitida, eventualmente, em comprimentos de onda distintos. Na superfície terrestre é comum que os alvos reemitam radiação de onda longa devido ao seu aquecimento.

De forma geral, os satélites em órbita carregam sensores passivos, ou seja, que não possuem fonte própria de radiação e medem somente a radiação refletida e/ou emitida pelos diversos alvos na superfície da Terra. As diferentes faixas de comprimento de onda são denominadas bandas e os satélites mais recentes, como o LANDSAT, possuem diferentes sensores para capturar a radiação correspondente às diferentes bandas.

A água apresenta baixa reflectância tanto nas bandas do verde quanto do infravermelho médio (MIR), sendo que o Índice Modificado de Diferença Normalizada da Água (MNDWI) proposto inicialmente por McFeeters (1996) e mais recentemente adaptada por Xu (2006) possibilita a delimitação e extração precisa dos ambientes aquáticos e é calculado conforme equação 1.

$$MNDWI = \frac{verde - MIR}{verde + MIR} \quad (\text{Equação 1})$$

O índice realça feições no ambiente aquático e são gerados resultados com valores positivos para os corpos d'água, e valores nulos ou negativos para a vegetação e o solo.

Recentemente, diversos trabalhos têm proposto a estimativa do volume em reservatórios por meio da integração de área e nível d'água estimados por satélite. É o caso

de Medina et al., (2010), Abileah et al., (2011) e Sima e Tajrishy (2013), que usaram essa abordagem para estimar volumes de reservatórios na Guatemala, no Egito e no Irã, respectivamente.

No Brasil, há o trabalho de Namikawa (2015), que utilizou o satélite LANDSAT 8 para estimar diferenças de volume de água em reservatórios do sistema Cantareira, em São Paulo. Collischonn e Clarke (2016) avaliaram as incertezas de curvas cota-volume do reservatório de Bico da Pedra em Minas Gerais, por meio de sensoriamento remoto. Neste trabalho, foram apresentadas pelos autores uma forma barata de cubar reservatórios de regularização, estimando-se sua curva cota-área-volume com base em uma sequência de imagens de satélite e nos dados de nível d'água. Os resultados foram validados com base em um reservatório que possuía uma batimetria mais atualizada e confiável.

Todos os trabalhos mencionados afirmam ter obtido bons resultados com essa metodologia alternativa. Destaca-se o fato de que os reservatórios avaliados nestes trabalhos situam-se em países em desenvolvimento, que tendem a ter maior carência de medições periódicas da capacidade de armazenamento.

3- METODOLOGIA

3.1- Conceção geral

O volume de um reservatório pode ser obtido por meio da integração da função que relaciona a área inundada com o nível d'água, conforme equação 2.

$$V_i = \int_{h_0}^{h_i} A_i \cdot dh \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- A_i : Área inundada
- V_i : volume armazenado pelo reservatório em um dado nível h_i .

A equação $A = f(h)$ foi obtida por meio de uma equação de regressão, a partir de um conjunto de pares de dados de área inundada e nível d'água. O modelo mais adequado para representar essa relação é a equação potencial, conforme indicado na equação 3 (MOLLE e CADIER 1992).

$$A = a \cdot (H - H_0)^b \quad (\text{Equação 3})$$

Os parâmetros de ajuste “a” e “b” foram obtidos em ambiente *MS Excel*, por meio da função de regressão, ou ajuste de linha de tendência, utilizando o procedimento de mínimos quadrados. O parâmetro H_0 , corresponde aproximadamente ao nível d’água em que a área inundada, e conseqüentemente o volume, são nulos. Foi adotada a altitude do ponto mais profundo do reservatório (1008 m) para o parâmetro H_0 , conforme curva cota-área-volume obtida da batimetria de 2002.

Uma vez determinada, por meio da regressão, a equação que relaciona áreas inundadas e níveis d’água, esta foi integrada por meio de um procedimento numérico para obtenção da curva cota-área-volume, como descrito a seguir:

- I. Fixou-se um intervalo Δh , suficientemente pequeno, de 1cm;
- II. Calculou-se a área inundada por meio da equação de regressão para $H_0+\Delta H$, $H_0+2.\Delta H$, $H_0+3.\Delta H$, ... até H_{\max} ; que no caso do reservatório do Descoberto H_{\max} corresponde ao nível d’água junto à soleira do vertedor na cota 1030 metros;
- III. Admitindo-se que a taxa de variação da área no intervalo ΔH obedece a uma relação linear, o volume de cada incremento ΔH foi calculado como o volume de um prisma, ou seja $(A_i+A_{i+1}).\Delta H/2$;
- IV. Somou-se o volume de todos os prismas, de forma a gerar uma curva cota-área-volume.

O procedimento de integração foi realizado de forma tabular no *MS Excel*. Para a determinação do volume absoluto houve a necessidade de extrapolação, em particular no extremo inferior da curva cota-área, pois dificilmente tem-se imagens de satélite com o reservatório completamente seco ou mesmo próximo disso.

Uma vez gerada a curva cota-área-volume por sensoriamento remoto, esta foi comparada com a curva atualmente adotada (Figura 3), de forma a avaliar o grau de assoreamento do reservatório desde a última batimetria, em 2002.

3.2- Área Inundada

A área inundada pelo reservatório foi estimada com base em imagens de satélites disponibilizados gratuitamente, em diferentes bandas espectrais. Delimitou-se um período de análise dos últimos 5 anos, afim de evitar que tendências de médio e curto prazo, como o assoreamento, introduzam algum tipo de interferência no estudo. O quadro 2 indica as descrições dos satélites e as suas respectivas bandas espectrais.

Quadro 2: Descrições dos satélites utilizados

Satélites	Verde (0,52 a 0,60 micrômetros)	Infravermelho Médio (MIR) (1,5 a 1,7 micrômetros)	Resolução Espacial
LANDSAT-8	Banda 3	Banda 6	30m
SENTINEL-2	Banda 3	Banda 11	20m
RESORCE-SAT-2	Banda 2	Banda 4	23,5m

Fonte: Autor, 2018

As imagens do LANDSAT-8 e SENTINEL-2 foram retiradas do sítio do serviço geológico dos Estados Unidos (USGS), disponível em <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Enquanto os dados do satélite sino-brasileiro RESORCE-SAT-2 foram retiradas no sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), disponível em <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>.

Cada satélite possui sua frequência de revisita atualizada a cada 22,5 e 16 dias, respectivamente para os satélites RESORCE-SAT-2, SENTINEL-2 e LANDSAT-8. A precisão espacial e o horário de imageamento também variam entre os satélites utilizados.

3.2.1- Processamento das Imagens com uso de ferramentas de geoprocessamento

Todas as cenas disponíveis, sem a incidência de nuvens no período descrito, foram selecionadas. Foram utilizados os softwares *ArcGis* e *Qgis* para processamento e tratamento das imagens. Cada uma delas precisou passar por uma série de etapas para obtenção da área inundada, a seguir descritas:

- **Etapa 1:** Recorte das cenas (duas bandas) por meio de uma máscara em um retângulo envolvente ao reservatório do Descoberto, com o objetivo de diminuir o tempo de processamento;
- **Etapa 2:** Cálculo do índice MNDWI para o conjunto de *pixels* da imagem reduzida, utilizando a equação 1 e os rasters do verde e MIR para cada cena;
- **Etapa 3:** Reclassificação dos indicadores do MNDWI alterando os valores negativos para “zero” e os positivos e nulo para “um”;
- **Etapa 4:** Conversão do *raster* para vetor, ou seja, transformação em polígono;
- **Etapa 5:** Cálculo da área do polígono que representa a lâmina de água correspondente àquela data.

A figura 6 esboça as cinco etapas utilizando como exemplo o satélite Sentinel-2, referente ao dia 07/07/2017.

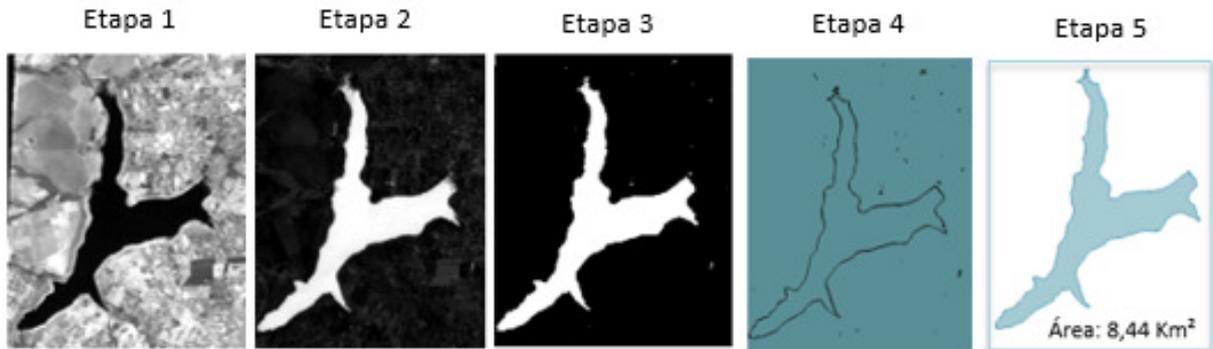


Figura 6: Etapas dos processamentos das imagens em ambiente de geoprocessamento

Fonte: Autor, 2018

3.3- Dados de Nível d'Água

Os dados de níveis de água do reservatório do Descoberto foram coletados utilizando os dados de monitoramento da Barragem do Descoberto (código 60435500), disponíveis no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), no site <http://hidroweb.ana.gov.br>. Originalmente, tratava-se de uma estação convencional, com leituras manuais duas vezes por dia. Mais recentemente, em 2014, foi instalada uma estação telemétrica no local, que disponibiliza os níveis de água a cada 15 minutos.

Para correspondência com as datas das imagens de satélite processada no período antecedente a 2014, foi utilizado o histórico de níveis de água, adotando a média entre as duas medições, e para o caso dos dados telemétricos foi utilizado o nível d'água medido ao meio dia (12h00min).

3.4- Intervalos de confiança

Como há imprecisões associadas à medição de área inundada e nível, é de se esperar que haja uma certa dispersão entre os pares de pontos obtidos. Essa dispersão, por sua vez, acarreta uma incerteza no resultado do volume obtido. Dependendo da magnitude dessa incerteza, a estimativa aqui realizada pode ser mais ou menos útil para o tomador de decisão. Assim, é pertinente analisar as incertezas relacionadas à metodologia aqui proposta, por meio do cálculo de intervalos de confiança para os volumes obtidos.

No presente trabalho, os intervalos de confiança foram estimados por uma abordagem *bootstrap* ou *montecarlo* proposto por Collischonn e Clarke (2016). Este método consiste em

repetir o procedimento de regressão e integração da curva um grande número de vezes, sendo que a cada iteração os pares A e h são reamostrados, com repetição

$$\ln A_r = a' + b' \ln(h_r - h_0') \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

- r : subíndices que representam os pares reamostrados;
- a' , b' e h_0' : parâmetros da regressão (distintos de a, b e h_0).

O número de iterações foi arbitrado em 5000, de forma que sejam obtidas todas as possibilidades de variação amostral, obtendo-se um volume distinto a cada nova iteração. Com isso, leva-se em conta a incerteza nos parâmetros a, b e h_0 da regressão.

O procedimento foi automatizado na linguagem de programação *Octave*, e ao fim das 5000 iterações, o programa identifica os percentis do volume com 2,5% e 97,5%, de forma a estimar os intervalos de confiança com 95% de confiabilidade.

3.5- Avaliação teórica do assoreamento

A avaliação do assoreamento no reservatório foi realizada de forma simplificada, por intermédio de uma metodologia teórica, com o intuito de comparar seus resultados com o assoreamento estimado a partir das imagens de satélite. Para realização do cálculo foram aplicados conceitos de eficiência de retenção, peso específico aparente dos depósitos e da descarga sólida afluyente, utilizando a equação 5 (CARVALHO, 2008).

$$V_{\text{assoreado}} = \frac{Q_{st} E_r A T}{\gamma_{ap}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

- E_r = eficiência de retenção do sedimento afluyente ao reservatório (% e fração);
- γ_{ap} = peso específico aparente médio dos depósitos (t.m^{-3});
- Q_{st} = descarga sólida média afluyente ao reservatório ($\text{t.km}^{-2} .\text{ano}^{-1}$);
- A = Área de drenagem da bacia (km^2);
- T = tempo de assoreamento de um determinado volume (anos);
- $V_{\text{assoreado}}$ = volume do reservatório assoreado (hm^3).

A eficiência de retenção consiste na habilidade de um reservatório reter os sedimentos. Essa grandeza foi estimada pelo Método da Curva de Brune que relaciona o

volume do reservatório e a vazão afluente anual. O modelo de Brune (1953), apresentado no gráfico 1 é utilizado para médios e grandes reservatórios e foi desenvolvido em represas nos Estados Unidos. As envoltórias da curva média dizem respeito aos depósitos contendo sedimentos finos (curva inferior) e grossos (curva superior).

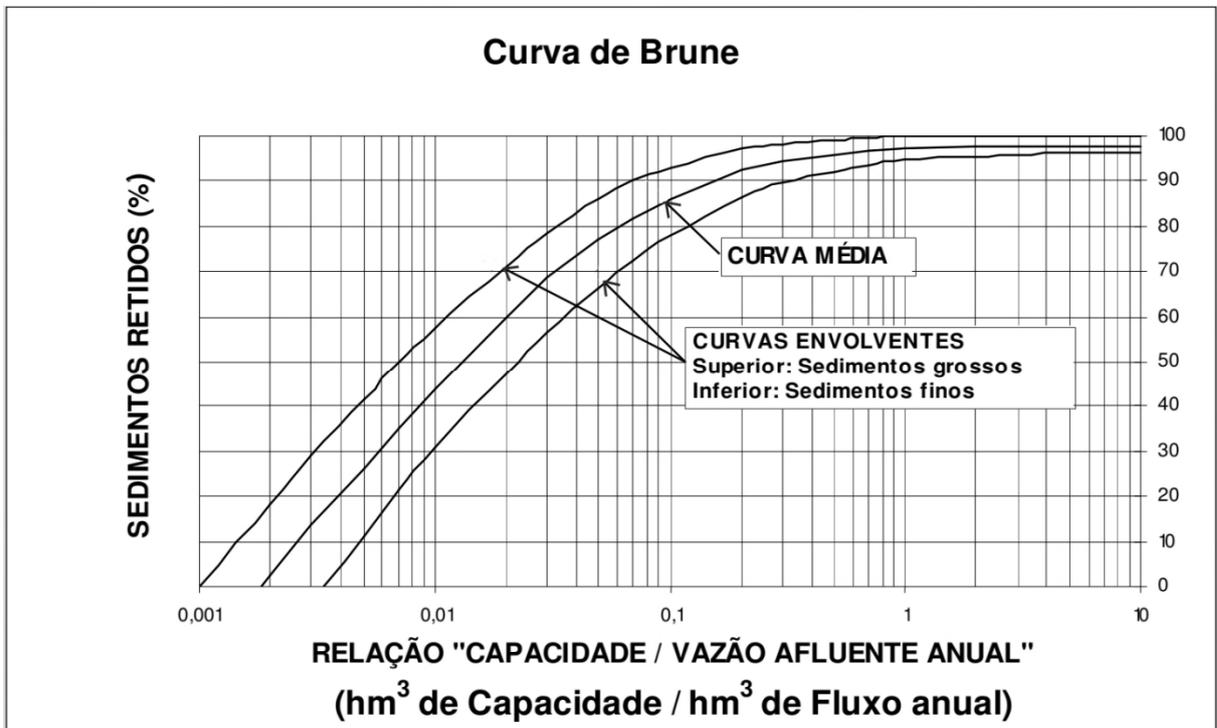


Gráfico 1: Curva de Brune

Fonte: BRUNE, 1953

Para determinação da eficiência de retenção pela curva de Brune, foi necessário obter a vazão afluente anual e a capacidade de armazenamento. A vazão média afluente ao reservatório foi retirada do estudo do balanço hídrico do reservatório do Descoberto, baseado nos registros das séries históricas, correspondente a $8,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A capacidade de armazenamento do reservatório e a área de drenagem da bacia foram descritos no Item 2.3 (CAESB, 2015).

O peso específico aparente está relacionado à operação do reservatório e da granulometria dos sedimentos depositados e pode variar de $1,1$ a $1,3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ para casos de reservatórios de grande porte (CARVALHO, 2008).

Devido à falta de dados de granulometria e da carga sólida em suspensão e de arrasto, para avaliação e estimativa do peso específico aparente foi adotado a valor $1,43 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ baseado em estudos desenvolvidos na bacia do reservatório do Descoberto (BICALHO, 2006).

A descarga sólida afluente ao reservatório foi retirada de um estudo desenvolvido por Campagnoli (2006), que classificou as terras do continente Sul-Americano quanto à produção de sedimentos, com base em características geomorfológicas, pedológicas, uso do solo, declives e precipitação pluviométrica. O produto deste estudo resultou no mapa de produção de sedimentos, com aplicação direta na avaliação da vida útil de reservatórios e degradação de bacias hidrográficas (Figura 7).

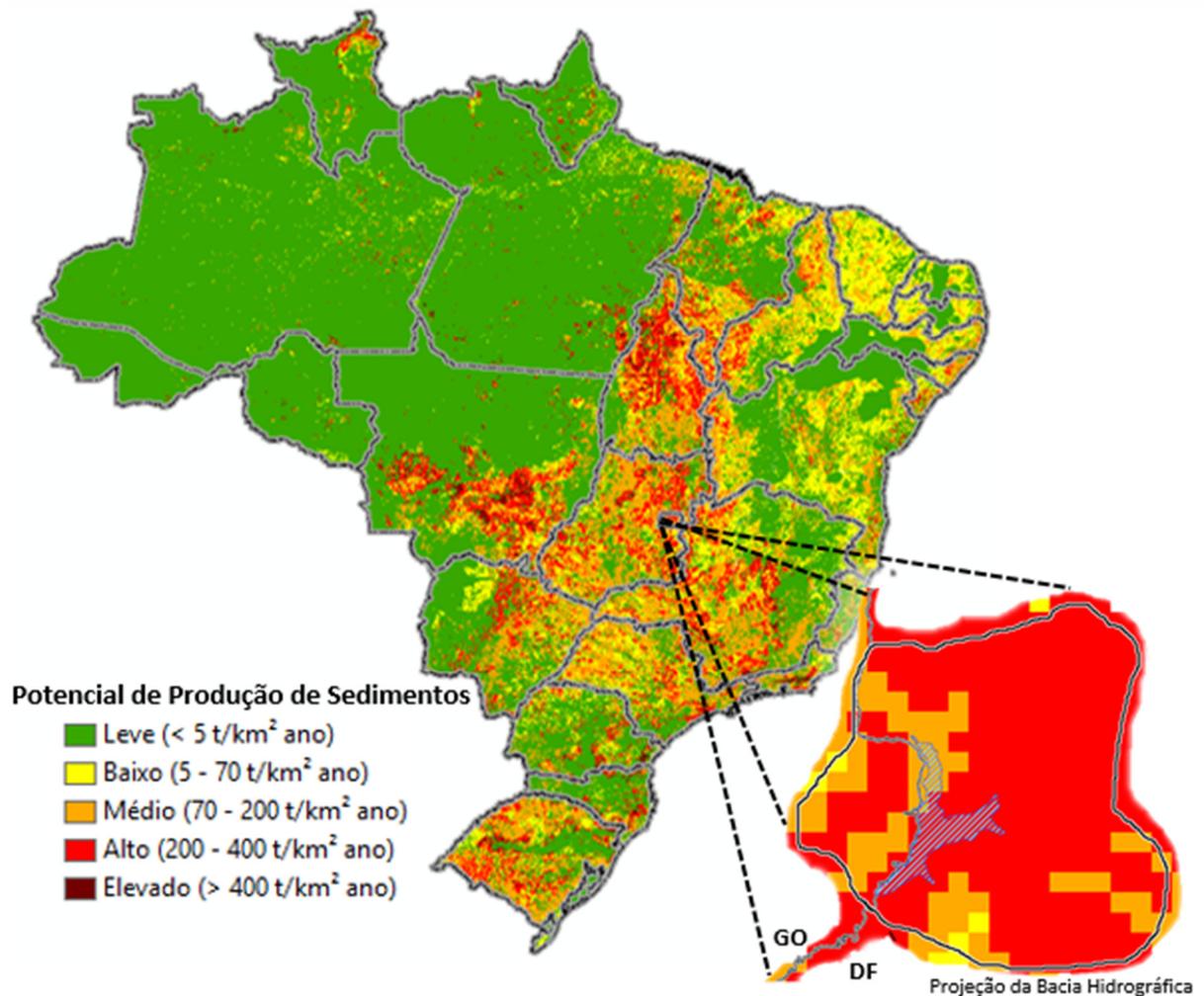


Figura 7: Mapa do potencial de produção de sedimentos

Fonte: CAMPAGNOLI et al., 2006, adaptado

Desta forma, avaliando a bacia do reservatório do Descoberto verifica-se a predominância da classificação com alto potencial de produção de sedimentos. Foi adotado um valor intermediário nessa faixa, correspondente a 300 t.km⁻². ano⁻¹ de descarga sólida.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1- Curvas cota – área e cota – volume resultantes

O estudo contemplou a seleção de imagens de satélites entre anos de 2013 a 2017. Para o satélite RESORCE-SAT-2, SENTINEL-2 e LANDSAT-8 foram utilizadas 18, 25 e 43 cenas respectivamente. Somente imagens sem a incidência de nuvens sobre a área do reservatório foram utilizadas. As sombras das nuvens possuem baixa refletância e absorvem a radiação do sol, assim como um ambiente aquático, o que provoca uma confusão na delimitação do que de fato correspondem aos corpos de água.

Segundo Collischonn e Clarke (2016) aplicação da metodologia com imagens de satélites requer que o reservatório tenha experimentado grande variação de níveis no período de análise. Essa condição foi preenchida no caso do Descoberto, tendo em vista que este verteu em abril de 2016 e registrou o menor nível histórico no final de 2017.

O gráfico 2 apresenta o resultado da regressão entre as áreas inundadas e níveis de água, além de realizar comparação com a curva advinda da batimetria antecedente.

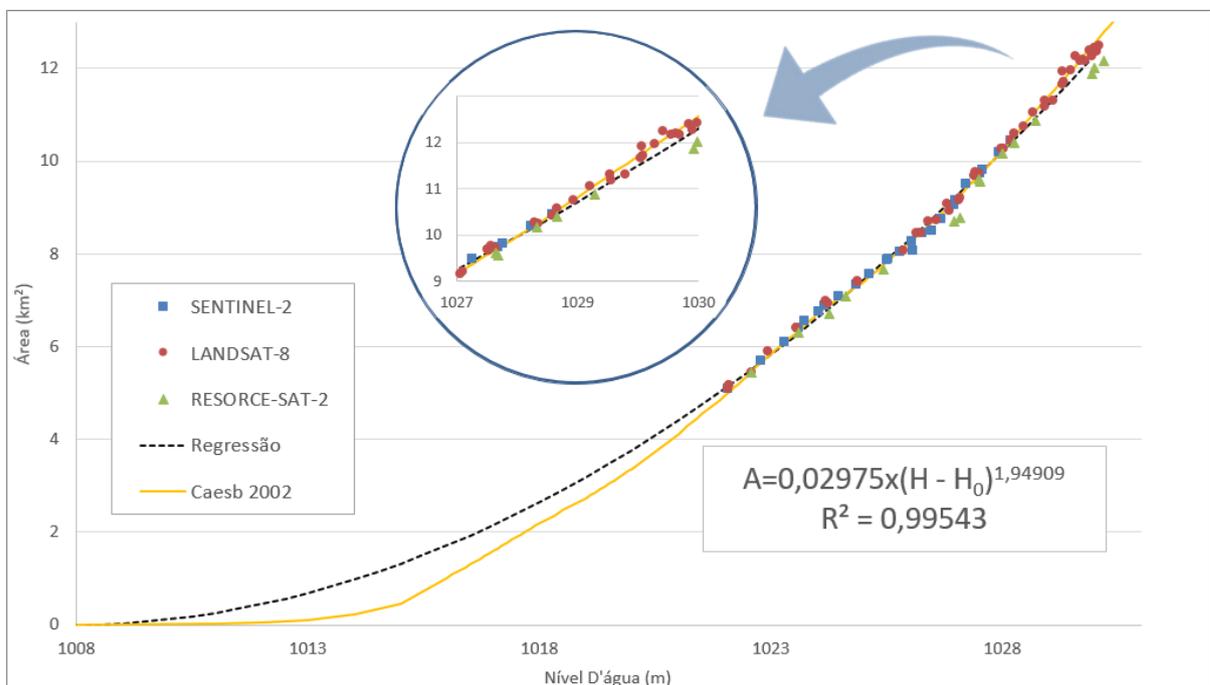


Gráfico 2: Regressão entre a área inundada e nível d'água

Fonte: Autor, 2018

Verifica-se que foi encontrada uma boa correlação entre a área inundada e nível d'água, em que o coeficiente de determinação (r^2) indicou que o modelo de regressão explica

bem a variabilidade dos dados. Quanto mais próximo o coeficiente estiver de 1, melhor os pontos estão alinhados à linha de tendência.

As imagens intermediárias e próximas ao nível de água do vertedouro são mais recorrentes, agregando maior confiabilidade à regressão nesse intervalo. Por outro lado, as imagens nas datas em que o reservatório esteve em níveis muito baixos, próximos ao volume morto, são naturalmente raras, de forma que há uma incerteza sobre o comportamento do extremo inferior da curva.

Observa-se que a extrapolação para níveis inferiores à cota 1021 leva a áreas inundadas maiores do que aquelas dadas pela curva vigente, o que fará com que o volume também seja superior ao atualmente adotado nesse tramo. A curva cota-volume resultante da integração da equação que relaciona áreas inundadas e níveis de água é apresentada no gráfico 3.

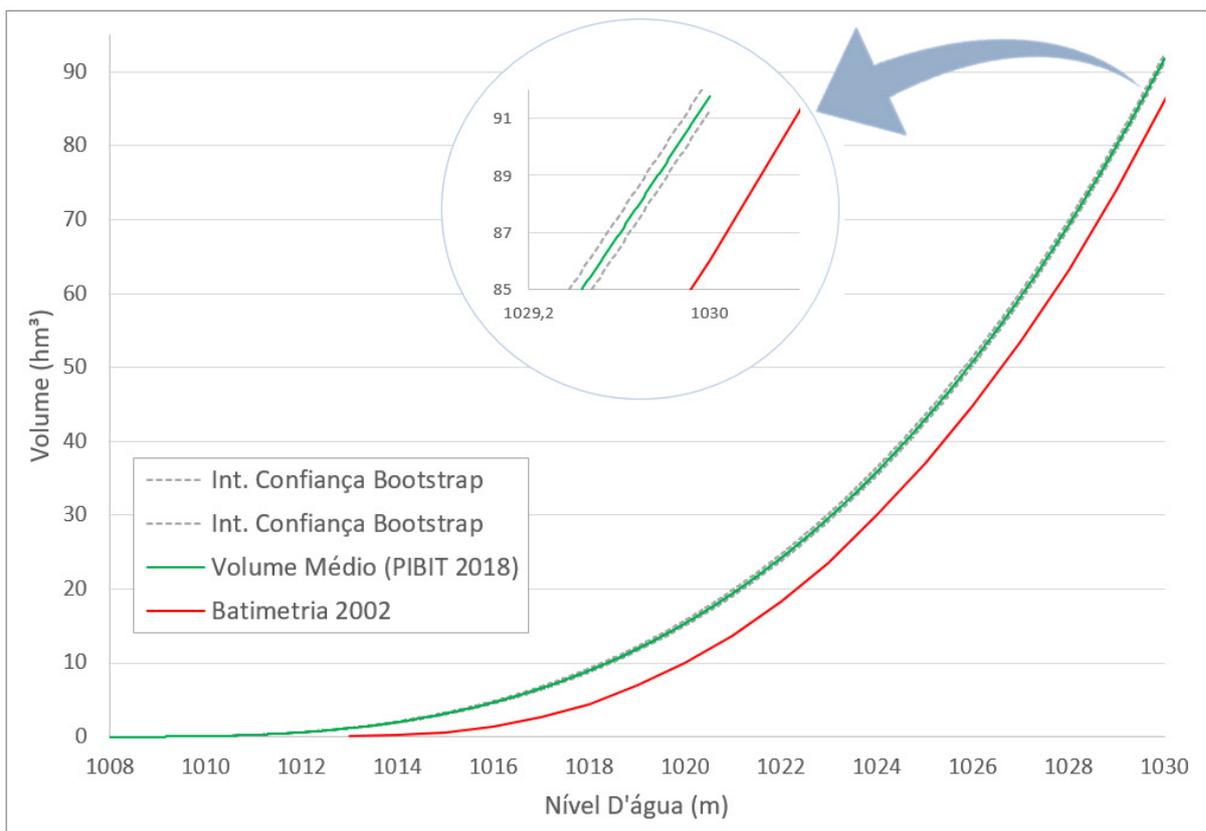


Gráfico 3: Curva cota – volume

Fonte: Autor, 2018

O volume total do reservatório, correspondente à cota 1030 m, resultante da estimativa por sensoriamento remoto, foi de 91,77 hm³, 6,7% a mais que volume obtido na batimetria de 2002. Os limites do intervalo de confiança, para o nível máximo com 95% de

confiabilidade, dado estes conjuntos de dados, foram de 91,27 hm³ e 92,42 hm³, possuindo desta forma uma variação muito estreita com incerteza de 1,15 hm³. Este intervalo de confiança estreito é resultado da pequena variabilidade observada nos dados amostrados.

Nota-se que essa diferença a mais é resultante da superestimativa no tramo inferior da curva cota-área, em que os dados foram extrapolados. Para uma comparação mais coerente, o mais adequado seria considerar somente a diferença de volume entre as cotas 1021 e 1030, que foi a faixa de variação efetiva dos níveis d'água do reservatório. Nesse intervalo, a batimetria de 2002 informa um volume de 72,29 hm³, enquanto a do presente trabalho resulta em 72,33 hm³, o que implica, virtualmente, no mesmo volume.

Esses resultados permitem estimar que não houve assoreamento expressivo nas zonas mais altas do reservatório. Em tese, estas seriam as áreas em que ocorrem as maiores deposições de material mais grosseiro. Entretanto, não se descarta a possibilidade de assoreamento em zonas mais profundas, próximas da tomada de água da barragem, visto que não se dispõe de imagens em cotas inferiores a 1021, nunca atingidas.

De forma a validar essa constatação sobre a ausência de assoreamento nas zonas mais altas, foi realizada uma comparação entre as áreas de lâmina de água de uma imagem antiga com uma mais recente. Obtiveram-se imagens do satélite LANDSAT nos anos de 1996 e 2016, nas quais o reservatório se encontrava exatamente com mesmo nível de água, na cota de 1026, o que representa cerca de 52% da capacidade de armazenamento. Nas duas datas, foi identificada a área inundada, sobrepondo-se as áreas, conforme figura 8.

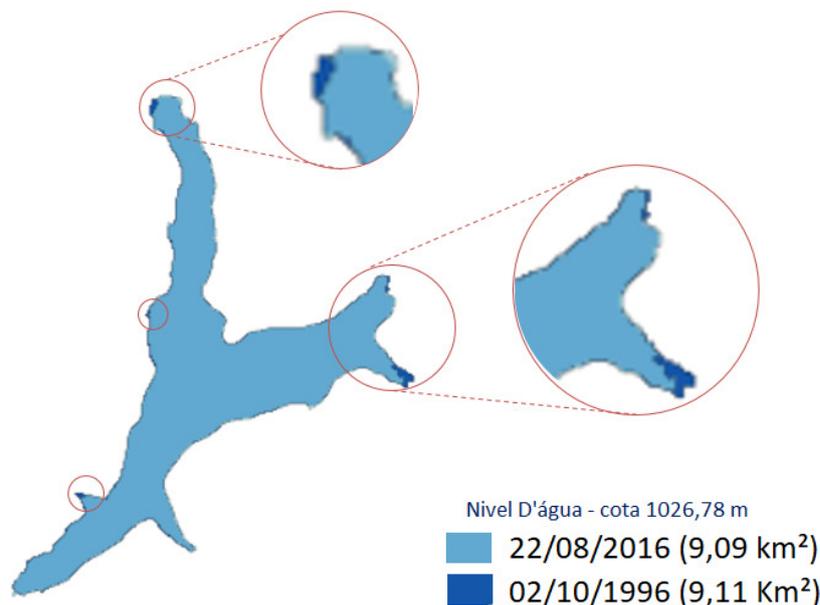


Figura 8: Comparativo entre área de lâmina de água em décadas diferentes.

Fonte: Autor, 2018

As sobreposições das áreas inundadas indicaram não haver grandes variações quando se observa um mesmo nível de água. Obteve-se no ano de 1996 uma área inundada levemente superior ao ano de 2016. Em algumas margens, a área em 2016 foi até superior, o que não faria sentido do ponto de vista hidrossedimentológico, sinalizando que as eventuais diferenças estão menos ligadas ao assoreamento propriamente dito, e possivelmente relacionadas a pequenas imprecisões no levantamento por satélite. Seja como for, decorridos os 20 anos entre as cenas, a variação foi mínima e condiz com os resultados encontrados no estudo.

4.2- Estimativa teórica do assoreamento

A estimativa teórica aqui feita visa a avaliar se o pequeno assoreamento estimado pelo levantamento por satélite é confirmado por uma metodologia consagrada na literatura.

Considerando a vazão média afluente ao reservatório de $8,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, obtém-se uma vazão anual equivalente a $256,07 \text{ hm}^3$, que relacionado com capacidade de armazenamento de 86 hm^3 , resulta em 33% capacidade de retenção da afluência média anual. Assim, utilizando a curva média de Brune, o reservatório possui uma eficiência de retenção de 95%.

Considerando ainda um potencial de descarga sólida média afluente ao reservatório de $300 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$, dado pelo mapa de produção de sedimentos, além do peso específico médio aparente dos depósitos de $1,43 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ e a área de drenagem da bacia de 433 km^2 tem-se, então, que o volume de sedimento retido no reservatório corresponde a $0,09 \text{ hm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$.

Dessa forma, a estimativa teórica resulta em um assoreamento do reservatório de cerca de $1,30 \text{ hm}^3$ nos últimos 15 anos, o que representa 1,5% da capacidade de armazenamento do reservatório. Esse volume relativamente pequeno, valida as conclusões obtidas a partir das imagens de satélite, de que o assoreamento tenha sido pouco expressivo no período.

4.3- Validação em campo

Visando ainda a uma avaliação qualitativa foi realizada uma visita aos principais afluentes que abastecem o reservatório, para identificar a incidência visual de assoreamento nas cabeceiras das sub-bacias. A figura 9 ilustra as cabeceiras do reservatório que foram visitadas.



Figura 9: Vista aérea da barragem do Descoberto em 13/10/2017

Fonte: <http://g1.globo.com/distrito-federal/dftv-2edicao>

A visita foi realizada no dia 13/11/2017, o que coincidiu com a semana em que o reservatório apresentou os menores níveis históricos, permitindo uma visualização oportuna dos efeitos. Os locais visitados são mostrados na figura 10.

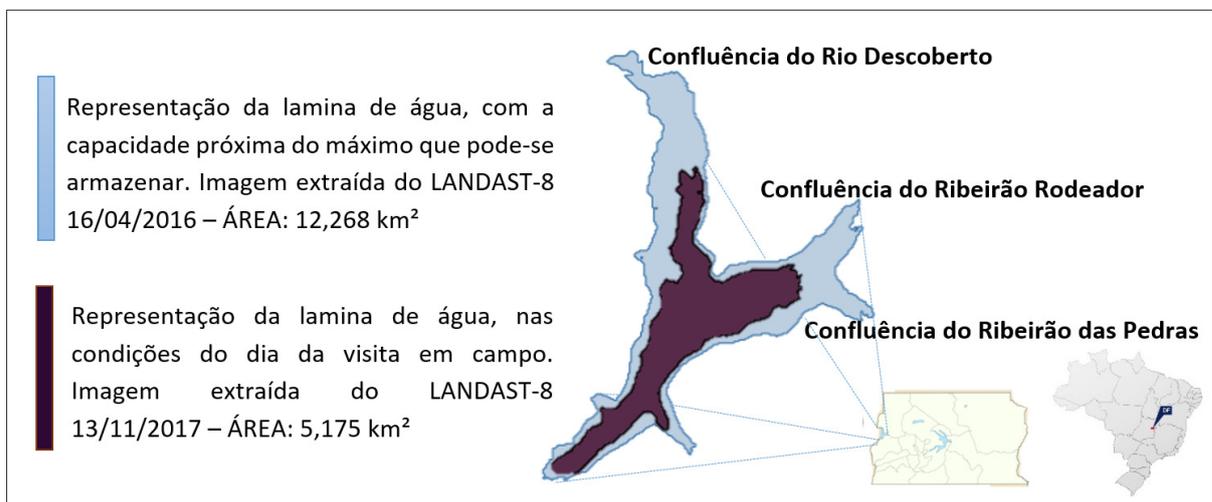


Figura 10: Representação dos pontos visitados

Fonte: Autor, 2018

Na confluência com Rio Descoberto constatou-se intensa vegetação do tipo rasteira e predominância de solo orgânico de cor escura e úmida. Possivelmente esse tipo de vegetação, ao se decompor, ocasiona algum tipo de acúmulo de material sólido, o que pode eventualmente contribuir com algum assoreamento a longo prazo (Figura 11).



Figura 11: Confluência do Rio Descoberto

Fonte: Autor, 2018

No entroncamento da barragem com o Ribeirão das Pedras foi verificada a existência de uma galeria de drenagem que despeja águas pluviais. Neste ponto existe uma bacia de dissipação para diminuir a velocidade do escoamento das águas, em que parte dos resíduos sólidos carregados pelas águas pluviais acaba por sedimentar antes de chegar ao reservatório. Também foi observada a ocorrência do processo erosivo ocasionado pela lavagem da camada superficial do solo logo abaixo da bacia de dissipação e incidência de pequenos bancos de areia sobrepondo o solo orgânico (Figura 12).



Figura 12: Confluência do Ribeirão das Pedras e despejo de galeria pluviais

Fonte: Autor, 2018

Na confluência com o Ribeirão do Rodeador observou-se a predominância de solo escuro, rachado e sem incidência de assoreamento, mas com presença de tronco de árvores. O ribeirão escoava por com um canal estreito até a união com represa (Figura 13).



Figura 13: Confluência do Ribeirão do Rodeador

Fonte: Autor, 2018

Mesmo com a presença de macrófitas em alguns pontos, áreas urbanas drenando diretamente para o reservatório e alguns pequenos bancos de areia, os acúmulos de sedimentos encontrados não foram considerados expressivos.

4.4- Validação junto à CAESB

Os resultados desse estudo foram apresentados para a Gerência de Recursos Hídricos e de Barragens da CAESB, tendo em vista que a companhia, como operadora do reservatório, é a principal interessada nos resultados obtidos. A reunião foi realizada em 24/04/2018 e os representantes da companhia mostraram-se interessados com assunto, tendo feito contribuições para a elaboração deste trabalho.

Foi relatado na reunião que a UNB, em parceria com a CAESB, realizou um levantamento batimétrico posterior ao de 2002, obtendo resultados superiores aos

atualmente adotados. Para maior segurança no gerenciamento dos recursos hídricos estocados, preferiu-se não utilizar estes resultados (MAGALHÃES CÉSAR, 2018).

Na ocasião foi informado também que se encontra em finalização uma nova batimetria para os reservatórios do Descoberto e de Santa Maria. Embora os resultados destes levantamentos ainda não tenham sido divulgados, foi adiantado que não houve uma perda expressiva na capacidade de armazenamento do reservatório do Descoberto de 2002 a 2018, resultando em uma capacidade levemente superior aos 86 hm³ atualmente adotados, o que converge com os resultados encontrados na pesquisa (MAGALHÃES CÉSAR, 2018).

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada uma estimativa da capacidade de armazenamento atual do reservatório do Descoberto (DF), baseada em dados de sensoriamento remoto. A partir da comparação com levantamentos anteriores foi possível estimar o assoreamento ao longo de quase 20 anos recentes.

Contrariamente ao senso comum, os resultados da estimativa demonstraram que não houve assoreamento, tendo resultado em uma capacidade levemente superior aos 86 hm³ anteriormente adotados. Esse resultado é, até certo ponto, surpreendente, uma vez que a bacia tem experimentado urbanização e ocupação muitas vezes desordenada, o que levava à expectativa de assoreamento. Foram realizadas vistorias em campo no período de níveis mais baixos do manancial, durante as quais tampouco foram identificados depósitos expressivos de sedimentos na porção superior do reservatório.

Por meio da metodologia por sensoriamento remoto, foi estimada uma capacidade total do reservatório cerca de 6,7% superior à obtida na batimetria de 2002. A conclusão é aderente a novos levantamentos de campo realizados recentemente pela CAESB, ainda não publicados, que também resultaram em volumes levemente superior à estimativa anterior.

Em parte, a porcentagem superior aqui obtida decorre da extrapolação no tramo inferior da curva cota-área, onde não há amostras de dados de nível e área para um melhor ajuste da curva. Por outro lado, se for considerada somente a diferença de volumes no tramo superior, entre as cotas 1021 e 1030, que foram os intervalos efetivamente amostrados, a capacidade de armazenamento encontrada foi virtualmente igual àquela dada pela batimetria de 2002.

Naturalmente, estes resultados não devem ser encarados como um estímulo à remoção da cobertura vegetal e à ocupação na bacia. Somente mostram que os impactos destas alterações sobre o assoreamento do reservatório do Descoberto parecem ser menores do que o senso comum sugere. Além disso, não se descarta que tenha havido assoreamento na parte mais profunda do reservatório, abaixo da cota 1021, uma vez que não há cenas nessas condições.

Foram calculados intervalos de confiança para a estimativa de volume, tendo em vista as incertezas associadas à metodologia. Estes foram bastante estreitos, resultado da pequena dispersão dos dados, permitindo assim uma boa confiabilidade na curva cota-área-volume estimada nesse estudo.

Uma estimativa teórica, baseada em metodologias consagradas na hidrossedimentologia, resultou em um assoreamento de 1,3 hm³ no período. Tendo em vista a pequena magnitude desse volume e as incertezas associadas a metodologia, considera-se que o resultado obtido também valida a metodologia remota adotada, bem como suas conclusões.

Cabe salientar quem, entre os objetivos da proposta inicial deste projeto constava a estimativa do impacto de um eventual assoreamento sobre o potencial de regularização de vazões do reservatório. Entretanto, como os resultados apontaram não ter havido assoreamento expressivo, infere-se que não há necessidade de realizar esta análise, visto que o impacto sobre as vazões regularizadas também tende a ser muito pequeno.

Por fim, a estimativa da capacidade de armazenamento de reservatórios por meio de sensoriamento remoto pode ser vista como uma possibilidade promissora, em particular em regiões mais remotas, em que questões logísticas podem elevar consideravelmente os custos de levantamentos convencionais.

Entende-se que a mesma metodologia pode ser replicada para outros mananciais importantes para o Distrito Federal, como os reservatórios de Santa Maria e Corumbá IV, sendo essa uma sugestão para os futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS

- ABILEAH, R. et al.. **A completely remote sensing approach to monitoring reservoirs water volume**. International Water Technology Journal, vol I, issue 1, 59-72, 2011.
- ADASA. **Níveis dos reservatórios do Distrito Federal**, 2018. Disponível em: <<http://www.adasa.df.gov.br/monitoramento/niveis-dos-reservatorios>>, consulta em: 09/07/2018.
- BICALHO, C. C. **Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio Descoberto**. Distrito Federal, 2006.
- BORGES R. O. et al. **Aplicação do índice da diferença normalizada da água (NDWI) na delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão no Rio Araguaia: avaliação das imagens Landsat 8 para o monitoramento hidroviário**. João Pessoa, 2015.
- BRUNE, J.; GUNAR M. **Trap Efficiency of reservoirs**. American Geophysical Union, 407-418, 1953.
- BRRUK, Stevan. **Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs**. UNESCO, IHP - II Project A.2.6.1. Paris, 1985.
- CAESB. **SIÁGUA -Sinopse do Abastecimento de Água do Distrito Federal**, Brasília-DF, 2014.
- CAESB. **Avaliação Preliminar da Bacia Hidrográfica de Influência do Lago e Levantamento da situação atual do Parque Estadual do Descoberto. Ocupações irregulares, Uso do Solo e Importância da Implantação**. Relatório. Brasília, 2015.
- CAMPANHOLI. **The production of the sediment of the South America continent: propose of mapping of the erosion rates based on geological and geomorphological aspects**. Revista Brasileira de Geomorfologia, ano 7, nº 1, 2006.
- CARVALHO, N.O et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed., ver., atual e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. Dissertação de Mestrado, IPH-UFRGS, 128p, 2006.
- COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. **Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto**. RBRH, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 719-727, 2016.
- HERITAGE, G.; LARGE, A. (Eds.). **Laser scanning for the environmental sciences**. John Wiley & Sons, 2009.

LOPES, J E; SANTOS, R C. **Capacidade de reservatórios**. São Paulo, 2002. Disponível em <file:///E:/PIBIT/Capacidade%20de%20Reservatorios.pdf>, consulta: 01/03/2018.

MAGALHÃES CÉSAR, M. C. **Comunicação pessoal**. Brasília, 2018.

MAGNA - Magna Engenharia Ltda. **Estudos de Concepção e de Viabilidade Técnica e Econômica para Elevação da Crista do Vertedouro**. Levantamentos Topobatimétricos. Volume II, Tomo 01/02, 2002.

McFEETERS, S. K. **The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features**. International Journal of Remote Sensing, vol 17, nº 7, 1425-1432, 1996.

MEDINA, C.; et. al.. **Water volume variations in Lake Izabal (Guatemala) from in situ measurements and ENVISAT Radar Altimeter (RA2) and advanced synthetic APerture Radar (ASAR) data products**. Journal of Hydrology, 382, 34-48, 2010.

MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do pequeno açude**. SUDENE-DPG-PRN, DPP-WR, 525p, anexos, 1992.

NAMIKAWA, L. M. **Imagens landsat 8 para monitoramento de volume de água em reservatórios: estudo de caso nas barragens Jaguari e Jacareí do sistema Cantareira**. - INPE São José dos Campos - SP, Brasil, 2015.

POLETO, C. **Ambiente e sedimentos**. Editora da ABRH, 404 páginas, 2008.

SANTOS, E. R.; COSTA, M. G. **Estimativa e previsão do assoreamento e distribuição do sedimento no Lago Descoberto em Brasília-DF**. Brasília, 2015.

SIMA, S.; TAJRISHY, M. **Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake**. Iran. Journal of Great Lakes Research 39, 90-99, 2013.

SOUZA, L. A. P. D.; et al. **Batimetria de alta resolução aplicada a estudos de reservatórios de água**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 2015. Disponível em: <<https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2015/07/Batimetria-de-alta-resolu%C3%A7%C3%A3o-aplicada-a-estudos-de-reservat%C3%B3rios-de-%C3%A1gua.pdf>>, consulta 02/03/2018.

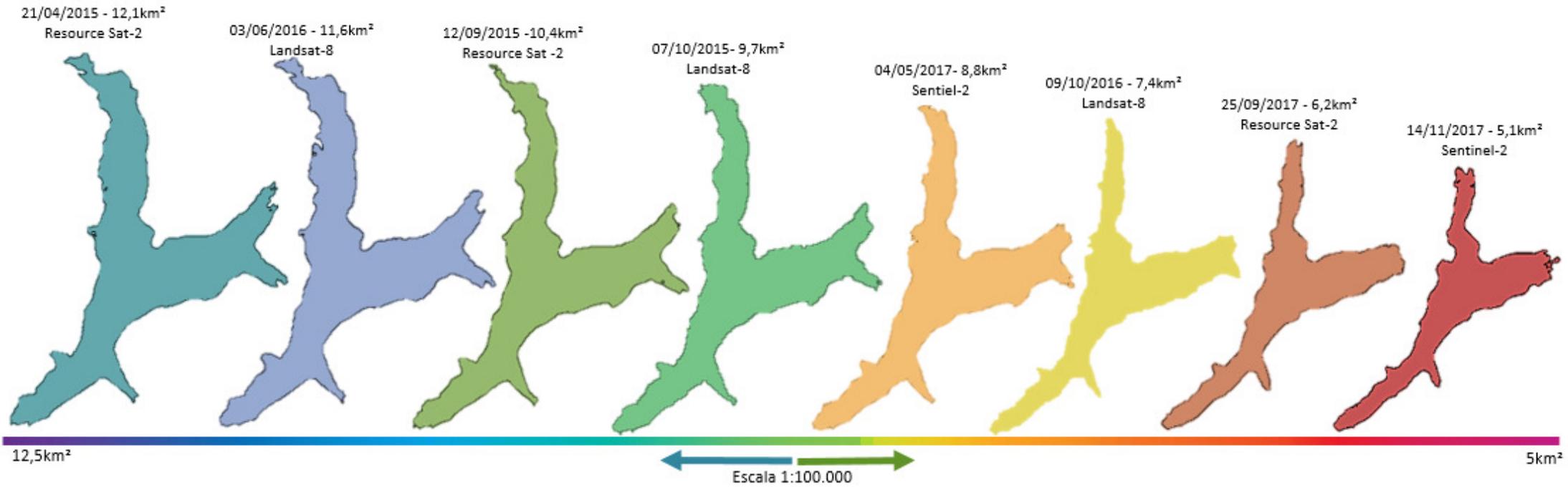
XU, H. **Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery**. International Journal of Remote Sensing, 2006.

APÊNDICES



APÊNDICE A – Fotografias da vistoria em campo

Fonte: Autor, 2018



APÊNDICE B – Representação do comportamento da lâmina de água do reservatório do Descoberto

Fonte: Autor, 2018