

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências (IGC)
Programa de Pós-graduação
Mestrado em Geografia

Determinação de Variação de Volume na Represa de Três Marias com o uso de Radar Altimétrico e Imagens Orbitais

Luiza Gontijo Álvares de Campos Abreu

Belo Horizonte
2016

Luiza Gontijo Álvares de Campos Abreu

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental

Orientador: Dr. Philippe Maillard

Belo Horizonte
2016

A162d 2016 Abreu, Luiza Gontijo Álvares de Campos.
Determinação de variação de volume na represa de Três Marias com o uso de radar altimétrico e imagens orbitais [manuscrito] / Luiza Gontijo Álvares de Campos Abreu. – 2016.
vii, 110 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Philippe Maillard.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2016.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Bibliografia: f. 51-56.

Inclui apêndices.

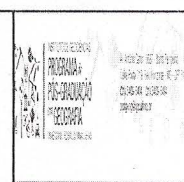
1. Sensoriamento remoto – Três Marias, Reservatório de (MG) – Teses.
2. Altitudes – Levantamento – Teses. 3. Hidrologia – Três Marias, Reservatório de (MG) – Teses. 4. Três Marias, Reservatório de (MG) – Nível da água – Teses. 5. Monitoramento ambiental – Três Marias, Reservatório de (MG) – Teses. I. Maillard, Philippe. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 528.8(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Determinação de Variação de Volume na Represa de Três Marias com o Uso de Radar Altimétrico e Imagens Orbitais

LUIZA GONTIJO ALVARES DE CAMPOS ABREU

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOGRAFIA, área de concentração ANÁLISE AMBIENTAL.

Aprovada em 19 de maio de 2016, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Philippe Maillard - Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof(a). Marcos Antônio Timbo Filho
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Adolf Heinrich Horn
UFMG

Belo Horizonte, 19 de maio de 2016.

Sumário

Resumo	i
Abstract	ii
Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Siglas e Símbolos	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Sensoriamento Remoto	5
2.1.1 Imagens de Satélite	6
2.1.2 Missões de Altimetria por Satélite	10
3 METODOLOGIA E DADOS UTILIZADOS	16
3.1 Área de Estudo	16
3.1.1 Bacia do Rio São Francisco	16
3.2 Área do Espelho D'água	18
3.2.1 Método usado pela CEMIG	18
3.2.2 Processamento das imagens	20
3.3 Dados de altimetria	25
3.3.1 Nível local (<i>in situ</i>)	25
3.3.2 Altimetria por Radar	28
3.4 Volume do Reservatório	33
3.4.1 Método usado pela CEMIG	33
3.4.2 Dados de Sensoriamento Remoto	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Áreas	35
4.2 Nível	36
4.3 Relação entre Nível, Área e Mudança de Volume	39
4.3.1 Relação entre Nível e Área	39

4.3.2	Varição de Volume ($\Delta Volume_{SWG}$)	41
4.4	Modelo de Área e Nível	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	BIBLIOGRAFIA	51
	APÊNDICES	57
A	Tabela de Datas e Dados de Sensoriamento Remoto Disponíveis	58
B	Tabela de Resultados das Áreas	64
C	Tabela de Resultados de Nível de Água	69
D	Tabela de Resultados do Modelo	73
E	Artigo Apresentado no evento SPIE Remote Sensing 2014	82

Lista de Figuras

1.1	Esquema simplificado do balanço hidrológico de um lago. Fonte: Adaptada de Robertson <i>et al.</i> (2003).	2
2.1	Linha do tempo da série de satélites Landsat. (A linha branca dentro da linha do tempo referente ao Landsat 7 representa a obtenção dos dados após a falha do SLC.) Fonte: NASA (2015).	6
2.2	Bandas espectrais dos sensores TM e ETM+ (retângulo preto), OLI (retângulo vermelho) e TIRS (retângulo azul). Fonte: Adaptada de NASA (2015).	8
2.3	Bandas espectrais do sensor REIS: B - Azul (<i>Blue</i>); G - Verde (<i>Green</i>); R - Vermelho (<i>Red</i>); RE - <i>Red Edge</i> ; NIR - Infravermelho próximo (<i>Near IR</i>). Fonte: BlackBridge AG (2015).	9
2.4	Réplica do Satélite Envisat. Fonte: Website da ESA(2015).	12
2.5	Satélite SARAL/AltiKa na sala estéril no Centro Espacial Satish Dhawan, Sriharikota - Índia. Fonte: Website da ISRO (2015).	14
3.1	Regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco nos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe.	17
3.2	Vista para a Usina Hidrelétrica de Três Marias. Fonte: CEMIG.	18
3.3	Gráfico da Curva Cota \times Área para a UHE Três Marias.	20
3.4	Detalhe das imagens de teste em composição “falsa cor”: a) e b) Landsat 5 TM 04/05/2010, pixel de 30 m e 5 m, respectivamente; c) RapidEye 2330413, 06/05/2010.	23
3.5	Imagem Landsat 8 OLI do dia 12/05/2013: a) extensão total da cena; b) recorte utilizado para a classificação do Reservatório.	24
3.6	Croqui de localização da Estação de Monitoramento UHE Três Marias Barramento. (Elaborado por Fábio Magno, CEMIG, Agosto de 2014)	26
3.7	Referência de Nível 1 presente na Estação de Monitoramento UHE Três Marias Barramento. (Foto fornecida pela CEMIG, sem data)	27
3.8	Fotos das réguas limnométricas na estação de monitoramento. (Fotos fornecidas pela CEMIG, Dezembro de 2014)	27
3.9	Estrutura das instalações do Limnógrafo. (a) Parte interna da estação de monitoramento; (b) Parte externa da estação. (Fotos fornecidas pela CEMIG, Agosto de 2015)	28

3.10	Princípio da altimetria por radar a bordo de satélite.(Fonte: Sulistioadi (2013))	30
3.11	Localização das Estações SWG selecionadas na órbita referente ao SARAL e Envisat.	31
3.12	Ilustração da saída gráfica do SWGTOOL: a) Tracks próximas ao ponto da Estação SWG 9, os dados são referentes aos ciclos 2 a 8 do SARAL em 2013. O ponto de número 2 está localizado fora da superfície de água do lago porém entre duas linhas do <i>shapefile</i> ; b) pontos de altimetria de sete tracks diferentes usados para fazer a média do nível de água.	32
3.13	Gráfico da Curva Volume \times Cota para a UHE Três Marias.	33
4.1	Série temporal do nível do reservatório de Três Marias entre 2000 e 2015 de acordo com dados <i>in situ</i> da CEMIG. Os losangos mostram os níveis de água calculados com dados Envisat e os triângulos mostram os níveis calculados com dados SARAL.	38
4.2	Relação entre Áreas e Nível de Água. a) A reta contínua cinza representa a regressão linear para os níveis SWG e áreas obtidas com as imagens de pixel de 30 m e a reta pontilhada para os níveis SWG e áreas obtidas com as imagens interpoladas para pixel de 5 m.; b) A curva contínua cinza representa a regressão não linear para os níveis SWG e áreas obtidas com as imagens de pixel de 30 m e a curva pontilhada para os níveis SWG e áreas obtidas com as imagens interpoladas para pixel de 5 m.	40
4.3	Relação entre volume e variação de nível de água. a)A reta pontilhada representa a regressão linear para o volume obtido com as áreas de 5 m e a reta cinza para o volume com as áreas de 30 m.; b) A curva contínua cinza representa a regressão não linear para o volume obtido com as áreas das imagens de pixel de 30 m e a curva pontilhada para o volume com áreas obtidas com as imagens interpoladas para pixel de 5 m.	43
4.4	Série temporal do nível do reservatório de Três Marias entre 2000 e 2015 de acordo com dados <i>in situ</i> da CEMIG. Os losangos mostram os níveis de água calculados a partir do modelo.	46
4.5	Série temporal das áreas do reservatório de Três Marias entre 2000 e 2015 de acordo com dados <i>in situ</i> da CEMIG. Os losangos mostram as áreas calculadas a partir do modelo.	47
4.6	Série temporal da variação do volume do reservatório de Três Marias para as 175 datas entre 2000 e 2015 de acordo com dados <i>in situ</i> da CEMIG. Os losangos mostram os valores de variação de volume gerados a partir do modelo, para as mesmas datas.	48

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros da missão RapidEye	9
2.2	Missões de Altimetria por Radar e Laser	11
2.3	Instrumentos a bordo do Envisat	13
2.4	Instrumentos a bordo do SARAL. Fonte: Bronner <i>et al.</i> (2013)	15
3.1	Características da UHE de Três Marias.	18
3.2	Coefficientes da Equação 3.1 para UHE Três Marias, fornecidos pela CEMIG.	19
3.3	Imagens RapidEye e Landsat 5 TM usadas no teste.	21
3.4	Áreas obtidas no teste realizado com as Imagens Landsat e RapidEye	22
3.5	Coordenadas das Estações SWG e Valor de Correção do Geoide	31
3.6	Coefficientes da Equação para UHE Três Marias	34
4.1	Estações SWG e níveis do dia 16/10/2002, obtidos através dos dados Envisat.	36
4.2	Valor do erro médio entre as medidas <i>in situ</i> e por satélite e erro médio quadrático para os dados de cada satélite.	37
4.3	Data das imagens, Sensor e Data da Passagem do Satélite de Altimetria	39
4.4	Variação de Volume do Reservatório em hm^3	41
A.1	Dados disponíveis para cada uma das 175 datas usadas no trabalho.	58
B.1	Resultados das 73 Áreas obtidas através das imagens Landsat e diferença entre a Área fornecida pela CEMIG, em km^2	65
C.1	Resultados de Altimetria (SWGTOOL) e Dados de referência (CEMIG)	69
D.1	Dados de referência (CEMIG) e Resultados de Altimetria (SWGTOOLS)	74

Resumo

A água mantém a vida na Terra e é fundamental para sustentar o estilo de vida das populações, sendo usada para consumo, produção de alimentos, navegação e geração de energia, principalmente. Apesar dessa importância, cada vez mais os recursos hídricos são utilizados contra seus limites, com o aumento das populações e da demanda do recurso hídrico.

Diferentes missões de satélites possuem instrumentos de medição da variação do nível dos oceanos e alguns desses instrumentos estão sendo usados em aplicações para águas continentais com resultados satisfatórios.

Altímetros a bordo dos satélites Envisat(RA-2) e SARAL(Altika) são usados para medir nível de água em corpos d'água continentais. Trabalhos sobre altimetria combinada com imagens de satélite mostram o grande potencial dessas técnicas para estimar o volume de água de rios, lagos, pantanais e reservatórios e sua variação temporal em resposta a variáveis climáticas e ambientais. O monitoramento consistente da variação do nível de reservatórios é crucial para o desenvolvimento de políticas e realização de ações relacionadas à distribuição e uso do recurso hídrico armazenado.

Este estudo apresenta um método para combinar altimetria e imagens, ambos gerados por satélite, do lago do reservatório da Usina Hidrelétrica de Três Marias para criar um modelo no qual o nível e a área podem ser computados um a partir do outro, assim como a variação de volume. Dados de monitoramento de nível *in situ* da CEMIG fornecidos para as datas desde 2000 até 2015, os coeficientes para as curvas de “cota \times área” e “cota \times volume” foram usados para validar os dados gerados a partir de sensoriamento remoto. Nesse período de tempo foram usadas imagens Landsat de 73 datas diferentes para obter a área do espelho d'água do reservatório e 102 medidas de nível a partir do Envisat e Saral.

A diferença média absoluta entre as medidas de área por sensoriamento remoto e as obtidas a partir da curva “cota \times área” da CEMIG é de $9,9 \text{ km}^2$. Já o RMSE para as medidas de nível por altimetria foi de $0,7 \text{ m}$ em relação às medidas *in situ* da estação no barramento da represa. O modelo final gerado com dados de sensoriamento remoto apresentou um $R^2 = 0,98$ em relação aos dados *in situ* da CEMIG.

Palavras chave: sensoriamento remoto, altimetria, hidrologia, lago, monitoramento, volume de água

Abstract

Water sustains life on Earth and is fundamental to support the lifestyle of the world's population, being used for consumption, producing food, navigation and energy generation, mostly. Despite this importance, the water resources are used to their limits, with increasing populations and the need for even more water.

Different satellite missions have instruments on board that measure the ocean level variations and now some of those instruments are being used in continental Waters with satisfactory results.

Altimeters aboard the Envisat(RA-2) and SARAL(Altika) satellites are used to measure water level in inland water bodies. Studies about altimetry combined with the use of satellite imagery show the great potential of these techniques to estimate the quantities of water in rivers, lakes, wetlands and reservoirs and its variation in time in response to climate and environmental variables. The systematic and consistent monitoring of the water level variations in reservoirs is crucial for the development of policies and the application of actions related to the distribution and use of the stored water resource.

This study presents a method to combine satellite altimetry and imagery from the Três Marias Hydroelectric Plant reservoir's lake to create a model in which the level or surface area can be estimated from one another, as well as the volume variations. *In situ* water level monitoring data from CEMIG were provided for the period from 2000 to 2015, the coefficients for the "level \times area" and "level \times volume" curves were used to validate the data generated from remote sensing. For this time period were used 73 Landsat images from different dates to obtain the water surface area for the reservoir and 102 water level measurements from Envisat and Saral.

The absolute difference mean between the area values from remote sensing and from the "level \times area" from CEMIG is $9,9 \text{ km}^2$. The RMSE for the altimetry level measurements is $0,7 \text{ m}$ in relation to the *in situ* measurements from the station at the dam. The final model created with remote sensing data has an $R^2 = 0,98$ in relation to the *in situ* data from CEMIG.

Keywords: remote sensing, altimetry, hydrology, lake, monitoring, water volume

Dedicatória

Dedico esse trabalho aos meus pais, Rogério e Myriam, que me deram todo o suporte, no sentido mais completo da palavra, para que eu me dedicasse exclusivamente na minha formação;

Ao meu mais que orientador, Philippe, por tudo nesses anos de convivência dentro e fora da Universidade;

Aos meus queridos “coleguinhas” da 105, Eric, Marília e Lilia, que são além de pessoas maravilhosas, pesquisadores fantásticos e me fizeram ser uma pessoa e pesquisadora melhor;

Aos meus amigos, que foram (e muitas vezes também não foram) compreensivos com meus sumiços e dias “gospel”;

Sem vocês nada disso teria acontecido.

Obrigada!

I blame all of you. Writing this “dissertation” has been an exercise in sustained suffering. The casual reader may, perhaps, exempt herself from excessive guilt, but for those of you who have played the larger role in prolonging my agonies with your encouragement and support, well... you know who you are, and you owe me.

Baseado em Pietsch (2015)

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos:

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Instituto de Geociências pelo suporte durante a realização do trabalho;

À Companhia Energética de Minas Gerais, por me fornecer os dados sem os quais essa dissertação não teria sido possível.

Siglas e Símbolos

SIGLAS

- ANA: Agência Nacional de Águas
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
- ASC: Agence Spatiale Canadienne
- AVISO+: Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data
- CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais
- CNES: Centre National d'Études Spatiales
- CTOH: Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère
- DORIS: Doppler Orbit Determination Radiopositioning Integrated on Satellite
- Envisat: Environmental Satellite
- EPSG: European Petroleum Survey Group
- ERS: European Remote Sensing Satellite
- ERTS-1: Earth Resources Technology Satellite
- ESA: European Space Agency
- ETM: Enhanced Thematic Mapper
- ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus
- GEOS-3: Geodetic and Earth Orbiting Satellite 3
- GloVis: Global Visualization Viewer
- GPS: Global Positioning System
- INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- ISRO: Indian Space Research Organisation
- MDT: Modelo Digital de Terreno

- MMA: Ministério de Meio Ambiente
- MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- MSS: Multi-Spectral Scanner
- NASA: National Aeronautics and Space Administration
- OLI: Operational Land Imager
- RBV: Return Beam Vidicon
- REIS: RapidEye Earth Imaging System
- RMSE: Root Mean Square Error (Erro médio quadrático)
- SAR: Synthetic Aperture Radar
- SARAL: Satellite with Argos and AltiKa
- SISEMA: Sistema Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais
- SLC: Scan Line Corrector
- SNIRH: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
- SRC: Sistema de Referência de Coordenadas
- SSC: Spectral-spatial Classifier
- SWGTOOL: Satellite Water Gauge Tool
- SWOT: Surface Water Ocean Topography
- TIRS: Thermal Infrared Sensor
- TM: Thematic Mapper
- UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais
- UHE: Usina Hidrelétrica
- USGS: United States Geological Survey

SÍMBOLOS

- α : Altitude do satélite
- σ : Coeficiente de retroespalhamento do radar
- σ : Desvio padrão
- λ : Comprimento de onda

- μ : Média
- ρ : Valor da amplitude do pulso emitido
- GHz : Gigahertz
- H_w : Altitude da superfície
- hm^3 : Hectômetro cúbico
- nm : Nanômetro
- $\Delta Nível$: Variação de Nível
- $\Delta Volume$: Variação de Volume

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Os rios e lagos estão entre as maiores fontes de água para consumo humano e representam 0,26% do volume total de água doce do planeta encontrada também na forma de geleiras, *permafrost* e água subterrânea (Shiklomanov, 1998). O monitoramento dos recursos hídricos é uma questão crucial com o aumento da população e conseqüentemente da demanda por água. Monitorar a qualidade e garantir a quantidade de água disponível requerem sistemas confiáveis para assegurar que o recurso esteja disponível de maneira contínua nos rios e lagos.

Modelos hidrológicos e hidráulicos auxiliam seus usuários a entender os processos das bacias hidrográficas e seus componentes, permitindo que as decisões a respeito dos recursos hídricos sejam tomadas conscientemente. Os modelos hidrológicos apresentam limitações e problemas por envolverem variáveis que são somente estimadas e não medidas de fato. As incertezas e erros gerados a partir das estimativas dessas variáveis podem gerar resultados errôneos ou até resultados certos com processos errôneos. Assim sendo, calibração e validação são procedimentos necessários para que um modelo hidrológico seja considerado operacional (Duan, 2003).

O monitoramento sistemático da variação espacial e temporal do volume de água armazenado nos lagos dos reservatórios, de maneira regular e precisa, é essencial para entender os processos ambientais das áreas no entorno dos mesmos, desde a interferência das variações climáticas na disponibilidade hídrica até a gestão do recurso hídrico disponível pelos diferentes setores da sociedade (Crétau e Birkett, 2006).

A bacia do Rio São Francisco é a maior bacia brasileira contida completamente dentro do território nacional, tendo um papel fundamental na geração de energia e abastecimento de água para a região semi-árida do Brasil. Ao longo de toda a bacia e também em seus reservatórios estão presentes estações de monitoramento tanto de qualidade quanto quantidade de água. Os principais reservatórios da bacia estão localizados no canal principal do Rio São Francisco. As represas de Sobradinho, Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso e Xingó estão localizadas na porção mais baixa da bacia, formada pelo Sub-Médio e Baixo São Francisco, e somente a represa de Três Marias está localizada na porção superior da bacia, o Alto São Francisco (entre coordenadas 18°15' a 19°S; 44°18' a 45°29'W).

O balanço hidrológico é um elemento essencial dos estudos relativos à água, seja para análise dos aspectos de qualidade ou quantidade. Determinar esse balanço, tanto para bacias

inteiras, rios, áreas alagadas ou lagos requer conhecimento a respeito de todos componentes do sistema hidrológico e demanda domínio de fatores específicos e técnicas de medição. Como o domínio desses conhecimentos e técnicas é muito variável na realização dos estudos, a confiabilidade dos balanços hidrológicos varia de local para local e de estudo para estudo (Winter, 1995).

O conceito do balanço hidrológico de um lago é matematicamente simples: a variação do volume armazenado do lago é a diferença entre o fluxo de entrada e o fluxo de saída de água (Figura 1.1). Os lagos interagem com todos os componentes do sistema hidrológico: água atmosférica, superficial e sub superficial (subterrânea). O *input* e o *output* dessas componentes do sistema representam o balanço hidrológico do lago. Na prática esse balanço hidrológico do lago é algo mais complexo de se medir, uma vez que os fatores envolvidos são vários e a capacidade de medi-los é limitada. Lagos obtêm sua água através de: 1) precipitação direta da água atmosférica na sua superfície; 2) escoamento superficial e fluxo de cursos d'água e 3) infiltração da água sub superficial. A perda de água dos lagos ocorre por: 1) evaporação direta da água da superfície do lago para a atmosfera; 2) fluxo de rios saindo do lago e 3) água sub superficial através de percolação. A mudança de volume do lago é crucial em seu balanço hidrológico, uma vez que esse valor integra todos os fluxos de entrada e saída, representando o resultado final das interações presentes naquele ambiente (Winter, 1995; Crétaux e Birkett, 2006).

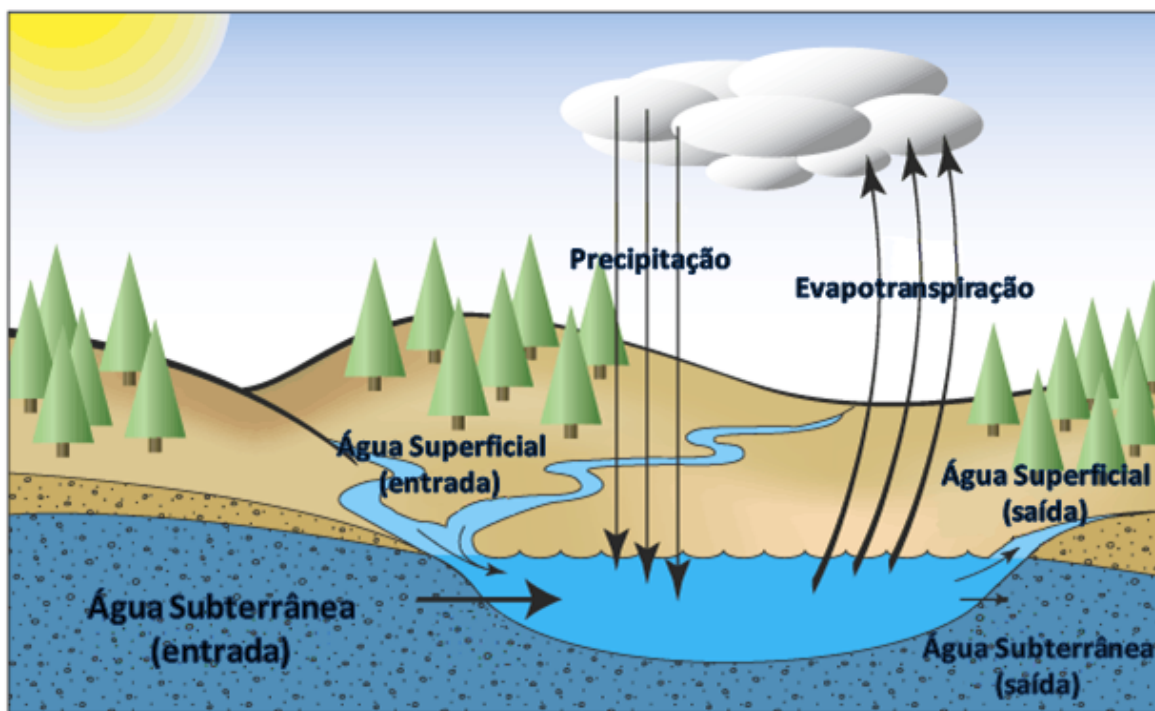


Figura 1.1: Esquema simplificado do balanço hidrológico de um lago. Fonte: Adaptada de Robertson *et al.* (2003).

A altimetria por satélite radar é uma técnica que viabiliza a tomada de medidas de nível

em oceanos, gelo, rios e lagos. Apesar de ter sido desenvolvida com o objetivo de monitorar os oceanos, a grande quantidade de dados em áreas continentais viabiliza os estudos em hidrologia, uma vez que o monitoramento sistemático da variação espacial e temporal do volume de água, de maneira regular e precisa, é essencial para entender processos ambientais.

Na década de 1970, estudos visando o monitoramento de recursos hídricos, tanto em aspectos de quantidade como de qualidade de água, começaram a ser desenvolvidos a partir de produtos e técnicas de sensoriamento remoto, usando principalmente imagens óticas para determinar aspectos de qualidade como sólidos em suspensão, sedimentos e presença de algas (Barker, 1975; Scherz *et al.*, 1975; Jantunen e Raitala, 1984; Gupta e Banerji, 1985). Já nas décadas de 1980 e 1990, com o lançamento de novos sensores, dados de radar e também altímetros passaram a ser usados no desenvolvimento de métodos de monitoramento de recursos hídricos, porém a combinação entre os diferentes tipos de dados (imagens, dados de altimetria e radar) foi feita tempos depois. Em meados da década de 1990 estudos focados em hidrologia continental aplicados a lagos, reservatórios e pantanais, tornaram-se mais frequentes com a disponibilidade e melhoria das técnicas de processamento dos dados disponíveis (Harris e Mason, 1989; Harris *et al.*, 1992; Birkett, 1994; 1995).

Já nos anos 2000, os trabalhos de Crétaux e Birkett (2006); Calmant e Seyler (2006); Calmant *et al.* (2008) e Gao *et al.* (2012) podem ser citados como exemplos base da aplicação de altimetria radar em águas continentais. Nos trabalhos de Crétaux *et al.* (2009) e Ričko *et al.* (2012), para grandes lagos do mundo (maiores que 100 km^2 , foi encontrada uma precisão de dois centímetros nos produtos de altimetria radar, porém para reservatórios menores esses mesmos erros podem variar desde milímetros até alguns metros como mostrado por Duan e Bastiaanssen (2013). De acordo com Arsen *et al.* (2015), altimetria radar por satélite pode ser usada para medir variações de nível d'água a longo prazo em lagos e reservatórios uma vez que essas variações temporais podem ter a magnitude de metros a decâmetros.

Estudos recentes sobre altimetria por satélite combinados com imagens orbitais demonstraram o grande potencial dessas técnicas para estimar o volume de água e a variação temporal do mesmo em resposta às mudanças do clima e outras variáveis ambientais no contexto de rios, lagos, áreas úmidas e reservatórios. Tais técnicas podem ser uteis para melhorar o monitoramento de reservatórios ou lagos já monitorados *in situ* ou fornecer informações acerca de reservatórios ou lagos nos quais dados não são compartilhados, porém as metodologias ainda não estão consolidadas.

O principal objetivo deste trabalho consiste em, apresentar um método que combine o uso da altimetria obtida por satélite, das missões *Environmental Satellite* (Envisat) e *Satellite with ARGOS and ALtiKa* (SARAL), com imagens Landsat da superfície do lago do Reservatório de Três Marias para modelar variações volumétricas e avaliar a precisão do método.

Foram formulados cinco objetivos específicos a fim de atingir o objetivo geral do trabalho:

1. construir uma série temporal de nível de água do lago da Represa de Três Marias a partir dos dados dos satélites Envisat e SARAL;
2. construir uma série histórica de área do espelho d'água do lago a partir de imagens de satélite Landsat;

3. aprimorar as medidas das áreas do espelho d'água a partir das imagens Landsat;
4. gerar um modelo de relação entre as medidas de área e nível d'água e variação de volume da represa;
5. comparar a abordagem dos métodos tradicionais de medição com a nova metodologia.

O texto do trabalho é dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica e a revisão acerca dos conceitos de sensoriamento remoto, seus diferentes tipos e aplicações envolvendo o tema da dissertação. O Capítulo 3 apresenta as características da área de estudo, os dados utilizados e expõe as etapas metodológicas envolvidas no desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados encontrados. E por fim o Capítulo 5 sintetiza os resultados e traz as considerações finais do trabalho.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é a ciência e a arte de se obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um equipamento que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno sendo investigado (Lillesand e Kiefer, 2007). É ciência no sentido que é um campo do conhecimento humano regido por regras, assim como a matemática, e uma arte ao passo que a interpretação de uma imagem ou dado visual obtido não depende somente do conhecimento científico de quem se propões a fazê-lo mas da experiência obtida ao longo da vida, experiência e aprendizado que não podem ser mensurados ou planejados. Essa sinergia entre o aspecto científico e o aspecto “artístico” permite aos estudiosos do sensoriamento remoto o desenvolvimento de habilidades científicas e empíricas para chegarem a resultados de interpretação (Jensen *et al.*, 2009).

Dezenas de missões de satélites para observação da Terra estão disponíveis e carregam os mais diferentes tipos de sensores para coleta de dados, variando em alcance espectral desde o ultravioleta até micro-ondas, sendo capazes de fornecer uma gama de informações diferentes sobre o planeta podendo ser desde a estrutura física até composição bioquímica de componentes da superfície terrestre (Ustin, 2004). As informações obtidas por sensoriamento remoto têm sido utilizadas em análises para criação de modelos ambientais complexos, para avaliar recursos naturais, determinar uso do solo e sustentabilidade de regiões de interesse, firmando-se cada vez mais como indispensáveis para a avaliação e medição de processos de escala regional até global. Em determinados casos, os dados de sensoriamento remoto se mostram a melhor alternativa, tanto econômica quanto logística, para prover medições de variáveis de uma área ao longo de uma série temporal, por exemplo em locais de restrição de acesso.

Dois tipos de dados de sensoriamento remoto são utilizados neste trabalho: 1) imagens de satélite e 2) dados de altimetria por radar.

2.1.1 Imagens de Satélite

Landsat

O programa Landsat, desde seu lançamento, fomentou o avanço da compreensão sobre o funcionamento dos ecossistemas, processos e evolução terrestre, além de estimular novas abordagens para a análise de dados e pesquisas acadêmicas e do setor privado agregando valor aos produtos possíveis de serem gerados (Lauer *et al.*, 1997). A série de dados orbitais fornecidos pelos satélites Landsat ao longo de mais de quatro décadas é um dos bens científicos mais valiosos disponíveis para a comunidade interessada nas ciências da Terra, e o programa segue com planos de continuar seu legado, com o lançamento do Landsat 9 no ano de 2023 (NASA, 2015). Os satélites lançados pelo programa são descritos de forma sucinta nessa seção e a linha de tempo do lançamento está ilustrada na Figura 2.1.

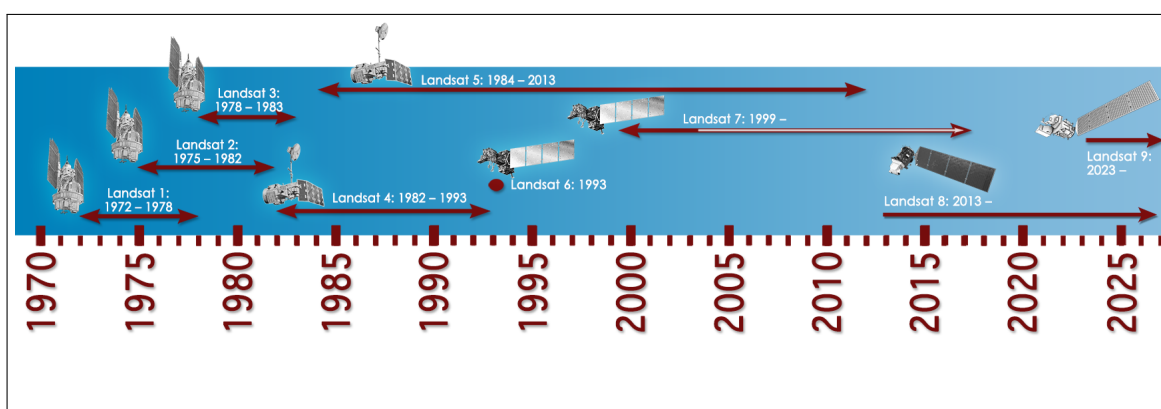


Figura 2.1: Linha do tempo da série de satélites Landsat. (A linha branca dentro da linha de tempo referente ao Landsat 7 representa a obtenção dos dados após a falha do SLC.) Fonte: NASA (2015).

O satélite Landsat 1, antes chamado de *Earth Resources Technology Satellite 1* (ERTS-1), foi o primeiro da série a ser lançado em 1972 inaugurando a era moderna do Sensoriamento Remoto, sendo o pioneiro no uso de plataformas orbitais para a aquisição de imagens da Terra de forma sistemática (Williams *et al.*, 2006). No ano de 1973, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) inaugurou a Estação de Gravação de Dados de Cuiabá, no Mato Grosso, tornando o Brasil o pioneiro no mundo a receber imagens Landsat fora do território norte-americano (Soares, 2010).

Os satélites seguintes, os Landsat 2 e 3, foram lançados respectivamente em 1975 e 1978. Os três primeiros satélites do programa operaram em órbitas quase polares em 920 km de altitude, fazendo uma cobertura quase completa de toda a superfície do planeta em 18 dias e 251 órbitas sobrepostas. Todos eles levavam em sua carga útil os sensores *Return Beam Vidicom* (RBV) e *MultiSpectral Scanner* (MSS)¹.

¹Os satélites Landsat 1 a 3 tem todo o seu funcionamento assim como a caracterização de sua carga útil e sensores detalhada nos livros *Manual of Remote Sensing* (Freden e Gordon Jr., 1983) e *Remote Sensing and Image Interpretation* (Lillesand e Kiefer, 2007)

O Landsat 4 foi lançado em 1982, com sua órbita mais baixa que seus antecessores a 705 km de altitude, cobrindo o planeta em 16 dias e 233 órbitas (Lillesand e Kiefer, 2007). Além do MSS, levava em sua carga útil o sensor *Thematic Mapper* (TM)², que possui sete bandas espectrais, diferente do sensor MSS que possui somente quatro (Lauer *et al.*, 1997). Devido a problemas de comunicação na transmissão dos dados, o Landsat 4 foi desativado em 1993 mas mantido em órbita, sendo totalmente descomissionado em 2001 (NASA, 2015).

O Landsat 5 foi lançado em 1984, e diferente do Landsat 4, continuou produzindo imagens muito além do esperado. Ele levava em sua carga útil os mesmos instrumentos que o Landsat 4, sensores MSS e TM. Sua expectativa de vida útil planejada era de apenas três anos, ao continuar sua operação para muito além disso, o Landsat 5 teve falhas em alguns componentes que, felizmente foram projetados com funções redundantes entre si e, caso houvesse um problema, existiria uma alternativa de funcionamento. As falhas foram solucionadas através de manobras de engenharia e procedimentos que garantiram a manutenção da coleta e transmissão de dados das imagens para as estações terrestres. Mesmo apesar do desgaste inerente ao passar do tempo dos recursos do satélite, os dados do Landsat 5 TM servem de referência para calibração do Landsat 4 TM e também de calibração cruzada dos dados do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo do Landsat 7 (Loveland e Dwyer, 2012). Pode-se dizer que o Landsat 5 foi um marco dentro do programa Landsat, um dos seus satélites mais importantes e com maior número de dados e imagens coletados ao longo de 26 anos de funcionamento. Em Dezembro de 2012, a *United States Geological Survey* (USGS) anunciou o descomissionamento do satélite e a última imagem enviada pelo Landsat 5 foi recebida em 6 de junho de 2013 e logo após o último comando para o desligamento total foi feito (USGS, 2012; 2013). Imagens geradas pelo Landsat 5 são usadas neste trabalho para obtenção do espelho d'água da Represa de Três Marias.

O Landsat 6 foi lançado em 1993 com o objetivo de dar continuidade ao programa e levava o sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM), porém ele falhou em alcançar sua órbita e nunca enviou dados de imagem. O sensor ETM incluía uma oitava banda além das sete bandas espectrais do sensor TM, chamada pancromática com resolução de 15 metros (Lauer *et al.*, 1997). Com a falha do Landsat 6 e os dois satélites anteriores operando além da vida útil de ambos, houve uma preocupação crescente sobre uma possível lacuna de dados no programa (NASA, 2015).

O sétimo satélite da série Landsat foi lançado em 1999 com o sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo visando a continuidade dos dados gerados pelos Landsat 4 e 5, esse sensor possui características do ETM que nunca chegou a funcionar no Landsat 6, mas com algumas melhorias (Williams *et al.*, 2006). O Landsat 7 superou sua expectativa de vida útil em 2004 e, assim como o Landsat 5, foi desenvolvido com componentes que realizam funções redundantes para o caso de ocorrência de falhas sua capacidade não fique comprometida. Algumas falhas ocorreram e foram corrigidas, porém em maio de 2003 o *Scan Line Corrector* (SLC) do ETM+, responsável por compensar o movimento frontal de avanço

²O sensor TM também segue descrito em *Manual of Remote Sensing* (Freden e Gordon Jr., 1983) e *Remote Sensing and Image Interpretation* (Lillesand e Kiefer, 2007).

do satélite para alinhar o a passagem de ida e volta do *scanner* ETM+, falhou causando uma perda de 22% de dados em cada cena(Loveland e Dwyer, 2012). Mesmo com essa falha, as imagens continuam sendo transmitidas e recebidas nas estações terrestres.

O Landsat 8, lançado em fevereiro de 2013, é o mais recente dos satélites do programa Landsat, sendo uma cooperação entre várias agências e conhecido também por *Landsat Data Continuity Mission* devido ao objetivo de manter a continuidade dos mais de 40 anos de dados de imagem presentes nos arquivos do Landsat. O satélite possui dois sensores em sua carga útil os quais as bandas reflectivas e as termais foram divididas, sendo respectivamente o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS)³, que coletam dados de todo o globo que são gravados a bordo em uma unidade de armazenamento e transmitidos para as estações terrestres (Irons *et al.*, 2012). Para o Landsat 8 a tecnologia *pushbroom* foi adotada, além da adição de mais bandas e melhorias em refinamento dos dados (Reuter *et al.*, 2015). A Figura 2.2 mostra as faixas espectrais dos sensores TM e ETM+ comparativamente aos sensores OLI e TIRS do Landsat 8. Uma das exigências para o desenvolvimento do sensor OLI era manter as resoluções espacial e espectral dos dados já existentes, assim como estar radiometricamente calibrado para estar na mesma escala e permitir comparações entre dados atuais e antigos, as respostas dos testes e análises de caracterização e calibração feitas pré e pós lançamento apresentaram resultados positivos provando que o Landsat 8 é uma continuação valiosa do legado do programa Landsat (Knight e Kvaran, 2014). Devido ao erro do SLC do Landsat 7 e a continuidade necessária para o monitoramento, imagens geradas pelo Landsat 8 são usadas no trabalho para obtenção do espelho d'água da Represa de Três Marias a partir do ano de 2013.

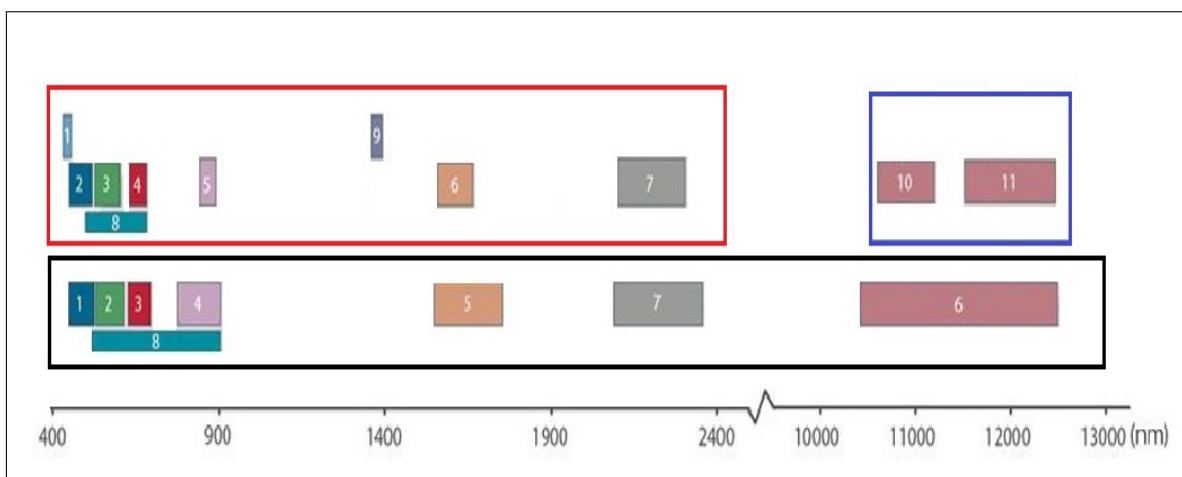


Figura 2.2: Bandas espectrais dos sensores TM e ETM+ (retângulo preto), OLI (retângulo vermelho) e TIRS (retângulo azul). Fonte: Adaptada de NASA (2015).

³Os sensores OLI e TIRS são descritos nos artigos Morfitt *et al.* (2015) e Reuter *et al.* (2015) respectivamente, da edição especial da revista *Remote Sensing*, “*Landsat-8 Sensor Characterization and Calibration*”.

RapidEye

A missão RapidEye é formada por uma constelação de cinco pequenos satélites idênticos que foram lançados em Agosto de 2008, no Cazaquistão, e são operados pela empresa canadense Blackbridge AG (antiga RapidEye AG) com o objetivo de prover a interessados, sejam governos ou usuários, produtos de imagens de alta resolução (Tyc *et al.*, 2005). Os satélites estão espacialmente posicionados em intervalos iguais na mesma órbita heliossíncrona, garantindo assim um imageamento consistente com tempo de revisita curto. Cada satélite visita o mesmo ponto em um intervalo de aproximadamente 19 minutos (Sandau, 2010). Algumas características da missão são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros da missão RapidEye

Característica	Informação
Número de Satélites	5
Lançamento	29 de Agosto, 2008
Órbita	Heliossíncrona (630 <i>km</i> de alt.)
Extensão da cena (órbita)	1500 <i>km</i>
Peso do Satélite	150 <i>kg</i>
Tamanho do Satélite	1m × 1m × 1m
Duração da Missão	7 anos (previsto)

O sensor *RapidEye Earth Imaging System* (REIS) presente nos cinco satélites da constelação produz imagens em cinco bandas espectrais na faixa de 400 a 800 *nm* e com resolução de 6,5 metros em nadir, após ortoretificação a resolução do pixel passa a 5 *m*, suas características espectrais estão apresentadas a seguir na Figura 2.3.

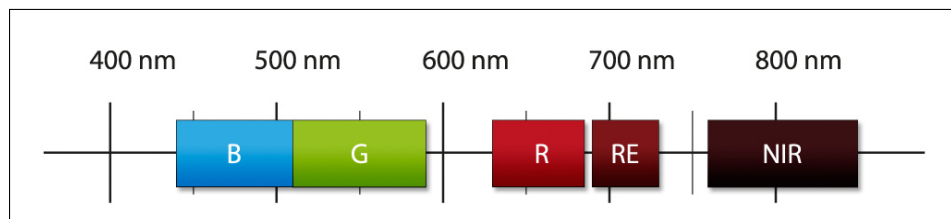


Figura 2.3: Bandas espectrais do sensor REIS: B - Azul (*Blue*); G - Verde (*Green*); R - Vermelho (*Red*); RE - *Red Edge*; NIR - Infravermelho próximo (*Near IR*). Fonte: BlackBridge AG (2015).

Por ter uma capacidade de gerar informações sobre qualquer ponto do globo em tempo muito curto, as imagens geradas pela RapidEye são usadas por diferentes aplicações como monitoramento agrícola, florestas, desastres naturais, cartografia e demais atividades que necessitem de atualização de dados mais veloz. Em 2010, o Sistema Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (SISEMA) adquiriu imagens RapidEye que cobriam todo o território de estado a fim de melhorar o mapeamento de focos de incêndio e também a qualidade do Mapa de Cobertura Vegetal de Minas Gerais. No presente trabalho imagens RapidEye da região do lago do Reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Três Marias foram usadas

para validar dados de reamostragem por interpolação de imagens Landsat, procedimento que está explicado no Capítulo 3.

O Ministério de Meio Ambiente (MMA) também adquiriu a cobertura completa do território brasileiro a partir do ano 2011, para uso exclusivo dos órgãos públicos e também para pesquisa acadêmica.

2.1.2 Missões de Altimetria por Satélite

Medições de altimetria por radar foram utilizadas inicialmente para aplicações em topografia oceânica, entretanto desde o lançamento dos primeiros altímetros na década de 1970, pesquisadores veem estudando as possibilidades em usar os dados em águas continentais (Silva, 2012).

O princípio da altimetria por radar é relativamente simples. Em linhas gerais, a altimetria por radar mede a distância entre o satélite e a superfície abaixo do mesmo através da emissão de ondas de radar, cujos ecos são refletidos pela superfície seja ela oceano, geleiras, gelo de mar, desertos, rios ou lagos. Essa distância, chamada de alcance (*range*), possui duas extremidades. Acima, é a posição do satélite que é conhecida de modo preciso através da órbita, referente ao elipsóide, com a contribuição de algum dispositivo de navegação a bordo do satélite como o *Orbit Determination Radiopositioning Integrated on Satellite* (DORIS) ou *Global Positioning System* (GPS), ou até mesmo ambos. Abaixo, a elevação absoluta da superfície (seja qual for a cobertura) é obtida da diferença entre a altitude da órbita e o alcance, com as correções para os efeitos atmosféricos de propagação e reflexão na superfície (Vignudelli *et al.*, 2011).

Em 1969, no Simpósio de Williamstown (Massachusetts, EUA) promovido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) os mais de 65 pesquisadores presentes identificaram várias técnicas que poderiam contribuir para o desenvolvimento dos estudos em geofísica terrestre e física oceânica, e no relatório final publicaram as principais recomendações para criação e desenvolvimento programas para fomentar esses campos de estudo. Em ordem de importância, os dois primeiros pontos colocados no relatório dizem respeito a criação de altímetros de precisão para serem colocados a bordo de satélites para obtenção de dados acerca da circulação oceânica e também gravimetria (Kaula *et al.*, 1970). Foram detalhadas especificações de projeto para uma missão de altimetria proposta à pela NASA, com objetivo de medir o formato da Terra. As especificações ditavam, dentre outras características, uma precisão de 1 metro, 10 segundos de intervalo entre as medições, vida útil de 1 ano para missão e órbita circular. As primeiras missões desenvolvidas e lançadas possuíam características bem próximas das especificações colocadas pelo relatório, foram elas a missão Skylab (1973), *Geodetic and Earth Orbiting Satellite 3* (GEOS-3, 1975) e Seasat (1978) (Sulistioadi, 2013). O desenvolvimento e avanço da tecnologia dos altímetros, com instrumentos mais precisos a bordo de satélites orbitando trajetórias mais regulares e conhecidas, fez com que a altimetria por radar passasse a fornecer dados importantes para estudos em Geodésia, Oceanografia, Glaciologia, Geofísica e Hidrologia Continental (Vignudelli *et al.*, 2011).

A Tabela 2.2 resume algumas das missões espaciais com altímetros a bordo, desde o

Tabela 2.2: Missões de Altimetria por Radar e Laser

Missão	Período de Operação	Precisão (cm)	Resolução Temporal (dias)
Skylab	1973 a 1974	> 100 cm	N/A
GEOS-3	04/1975 a 12/1978	60 cm	N/A
Seasat	07/1978 a 10/1978	10 cm	3, 17
Geosat GM e ERM	03/1985 a 01/1990	4 cm	23, 17
ERS-1	07/1991 a 06/1995	4 cm	3, 35, 168
TOPEX/Poseidon	08/1992 a 12/2005	2 cm	9.9
ERS-2	04/1995 a 06/2003	3 cm	35
Geosat Follow-On	05/1998 a 09/2008	3,5 cm	17
Jason-1	12/2001 a 2013	1,5 cm	9.9
Envisat	04/2002 a 2012	2 cm	35
ICESat-1†	01/2003 a 08/2010	1,6 cm	8.9, 91
Jason-2	06/2008 até o presente	2,5 cm	9.9
Cryosat-2	04/2010 até o presente	1,2 cm	30
HY-2A	08/2011 até o presente	5 cm	14
SARAL/AltiKa	02/2013 até o presente	4 cm	35
Sentinel-3A★	04/2014 até o presente	3 a 5 cm	27
Jason-3	Lançado em 01/2016	3 cm	9.9
ICESat-2†	Planejado para 2017	N/A	91
SWOT	Planejado para 2020	N/A	15-25
Jason-CS	Planejado para 2020	N/A	9.9

★ Essa missão é composta por uma constelação de satélites, sendo que Sentinel-3A foi lançado em março de 2016. Adaptada de Sulistioadi (2013).

† Utilizam a tecnologia lidar.

início dos estudos de altimetria por satélite. A cada novo lançamento, os altímetros tinham suas especificações e características melhoradas, com sucessivos avanços não só na tecnologia, mas também nas parcerias internacionais com a colaboração de agências europeias e norte americanas (Estados Unidos e Canadá).

A partir dos anos 1990, foram lançados os satélites *European Remote Sensing Satellite* (ERS-1) 1, (ERS-2) 2, e Envisat, todos da Agência Espacial Europeia *European Space Agency* (ESA) e também a missão conjunta entre a NASA e o *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES), TOPEX/Poseidon, que deu início a era de altímetros com duas frequências e com o objetivo principal de monitorar o nível do mar global e a circulação oceânica de larga escala (Vignudelli *et al.*, 2011; Sulistioadi, 2013). Dos anos 2000 até o presente a evolução da altimetria por satélite foi marcada pelo lançamento de múltiplas missões, dentre essas a missão *Environmental Satellite* (Envisat) e a missão SARAL, cujos dados serão utilizados no trabalho e seguem discutidas nas seções seguintes desse capítulo. Para o futuro existem ainda mais missões planejadas, tanto de continuidade de dados quanto missões inéditas. Uma dessas missões é uma cooperação entre a NASA e o CNES para observação de variações no nível oceânico e também de fenômenos de meso escala, chamada *Surface Water Ocean Topography* (SWOT). Essa missão será capaz de medir a superfície oceânica com uma precisão de 0,5 cm

e também medir águas continentais como rios e lagos com largura de até 100 m com precisão de 10 cm (Fu, LL and Alsdorf, D and Morrow, R and Rodriguez, E and Mognard, N, 2012; Sulistioadi, 2013).

Envisat

Depois do lançamento dos primeiros satélites europeus e o sucesso das missões, a ESA desenvolveu sua segunda geração de satélites para observação da Terra e meio ambiente, sendo o Envisat (Figura 2.4) o primeiro satélite dessa geração. Lançado em março de 2002, o Envisat possuía dois objetivos principais: (1) coletar dados ambientais em escala global e com uma série temporal longa para avaliar mudanças e tendências; (2) melhorar as capacidades de monitoramento e gestão dos recursos terrestres e contribuir para a compreensão dos processos ambientais da Terra (Gardini *et al.*, 1995). O projeto foi desenvolvido pelos países membros da ESA juntamente com a *Agence Spatiale Canadienne* (ASC), levando a bordo uma carga de 10 instrumentos elencados na Tabela 2.3 (ESA, 2014).



Figura 2.4: Réplica do Satélite Envisat. Fonte: Website da ESA(2015).

Tabela 2.3: Instrumentos a bordo do Envisat

Nome	Função	Aplicações
Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR)	SAR Banda-C	Imagens de alta resolução da superfície da Terra em todas as condições climáticas, tanto de dia quanto de noite.
Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS)	Espectrômetro do Ultravioleta ao Infravermelho Próximo	Análise dos gases na Atmosfera
Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS)	Espectrômetro do visível aos Infravermelho próximo	Imagens espectrais de cor dos Oceanos, nuvens, aerossóis e vegetação
Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS)	Interferômetro Infravermelho de visualização da borda atmosférica	Análise dos gases na Atmosfera
Microwave Radiometer (MWR)	Radiômetro de Visualização Nadir de dois canais	Correção de dados RA
Radar Altimeter (RA)	Radar de Pulso em Nadir	Topografia da superfície oceânica e terrestre, altura de ondas do mar, velocidade do vento
Advanced Along Track Scanning Radiometer(AATSR)	Radiômetro Ótico e Infravermelho	Temperatura da superfície oceânica; Vegetação
DORIS	Medição de Distância RF	Medidas precisas de posição
Scanning imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography(SCIAMACHY)	Espectrômetro do Ultravioleta ao Infravermelho de visualização Nadir e de Borda da atmosfera	Análise dos gases na Atmosfera
Scanner for Radiation Budget(SCARAB)	Radiômetros do Visível e Infravermelho	Balanco de Radiação

Adaptada de Gardini *et al.* (1995).

O RA-2 é um dos altímetros dos quais os dados coletados são usados na dissertação, esse instrumento dá continuidade ao sistema de altímetros dos satélites ERS-1 e ERS-2, uma vez que o Envisat utilizou a mesma órbita que os mesmos até Outubro de 2010 (Resti *et al.*, 1999; Diekmann *et al.*, 2010). Essa continuidade de dados pelo RA-2 possibilita a determinação de padrões temporais de mudança em fenômenos monitorados, como nível regional e global dos oceanos, padrão de circulação dinâmica dos oceanos, elevação de geleiras, dentre outros. As contribuições do RA-2 para a missão Envisat em diferentes áreas são descritas por Resti *et al.* (1999) e englobam os dados referentes a atmosfera, superfície continental, oceano, gelo e gravidade (Resti *et al.*, 1999).

Como a missão do Envisat possuía uma performance, até então, acima da esperada, assim como um interesse crescente nos dados científicos coletados a ESA optou por estender a missão

até o ano 2010, uma vez que o satélite tinha uma vida útil prevista somente até 2007. Com a preocupação da continuidade de dados e de não se gerar um “vazio” de dados a partir de 2010, a ESA novamente considerou estender a missão através do projeto chamado “Envisat 2010+” no qual o satélite teve sua órbita alterada através da diminuição da altitude, passando dos 800km de altitude para 782km. Com essa alteração, o Envisat passou a ter um ciclo de 30 dias e 431 passagens, ao invés dos 35 dias e 501 passagens (Diekmann *et al.*, 2010). A ideia era que a missão continuasse até 2013, porém em Abril de 2012 o contato com o Envisat foi perdido e a aquisição de dados foi finalizada (Steven, 2012).

SARAL

O projeto SARAL (AltiKa) (Figura 2.5) é uma colaboração entre a agência espacial indiana, *Indian Space Research Organisation* (ISRO), e o CNES no qual o satélite lançado orbita a mesma trajetória da antiga órbita do Envisat, garantindo a continuidade e consistência a longo prazo dos dados de altimetria coletados. Inicialmente a órbita não estava exatamente igual a do Envisat possuindo um desvio na ordem de 2,5km, esse desvio foi corrigido pela ISRO através de manobras no satélite e a órbita correta foi alcançada em Outubro de 2013 (Vincent *et al.*, 2000; Bronner *et al.*, 2013).



Figura 2.5: Satélite SARAL/AltiKa na sala estéril no Centro Espacial Satish Dhawan, Sriharikota - Índia. Fonte: Website da ISRO (2015).

O satélite foi lançado em fevereiro de 2013 para substituir o Envisat, sendo muito menor em relação a ele, e levando quatro instrumentos a bordo (Tabela 2.4), sendo um deles o altímetro-radiômetro AltiKa (ver Richard *et al.*, 2008; Bronner *et al.*, 2013).

Tabela 2.4: Instrumentos a bordo do SARAL. Fonte: Bronner *et al.* (2013)

Nome	Função
AltiKa	Altímetro-radiômetro para dados de altimetria
DORIS	Determinação de órbita com precisão usando estações terrestres dedicadas
Laser Reflector Array (LRA)	Calibração do sistema de determinação da órbita
ARGOS-3	Localização, aquisição e distribuição de dados ambientais

O AltiKa começou a ser desenvolvido em 2005 e faz parte de uma nova categoria de altímetros que possibilita que a carga responsável pela coleta de dados de altimetria (altímetro, sistema de localização e o radiômetro) caiba em um micro satélite, como o SARAL. Para tanto o AltiKa opera com uma única frequência na banda Ka, dispensando a necessidade de uma segunda frequência para correção de retardamento da ionosfera, permitindo que a mesma antena seja compartilhada pelo altímetro e pelo radiômetro diminuindo o tamanho da carga a ser acomodada no satélite (Richard *et al.*, 2008).

Capítulo 3

METODOLOGIA E DADOS UTILIZADOS

O presente capítulo descreve a área de estudo e os passos metodológicos desenvolvidos para obtenção, processamento e tratamento dos dados usados. A partir dessas etapas são estabelecidas as relações e análises entre os dados de altimetria por satélite e as imagens orbitais fomentando a criação do modelo que determina a variação de volume no reservatório da UHE de Três Marias.

3.1 Área de Estudo

3.1.1 Bacia do Rio São Francisco

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco (Figura 3.1, contida completamente dentro do território do Brasil, é maior bacia nacional e possui importância essencial no abastecimento de água na região semi-árida e também na produção energética do país (ANA, 2014). O rio nasce no Parque Nacional da Serra da Canastra, em Minas Gerais, e passa por outros quatro estados (Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas) sendo conhecido como rio da integração nacional (Ministério do Meio Ambiente, 2006).

A região do Alto São Francisco, onde o reservatório de Três Marias está localizado, engloba desde a Serra da Canastra até o fim do Rio das Velhas, um dos mais importantes afluentes do Rio São Francisco, tendo área total de $\approx 100.000 \text{ km}^2$ e altitudes variando de 600 a 1600 m. A vegetação que ocorre na área caracteriza-se pela predominância das fitofisionomias de cerrado e fragmentos de floresta estacional semi-decidual. O clima da região é classificado como tropical úmido de altitude, com precipitação anual entre 1100 a 2000 mm concentrada principalmente nos meses de Outubro a Abril. As principais cidades pertencentes a região do Alto São Francisco são Belo Horizonte e sua região metropolitana, Divinópolis e Sete Lagoas. A população total da região é de aproximadamente 6,38 milhões de habitantes (Ministério do Meio Ambiente, 2006).

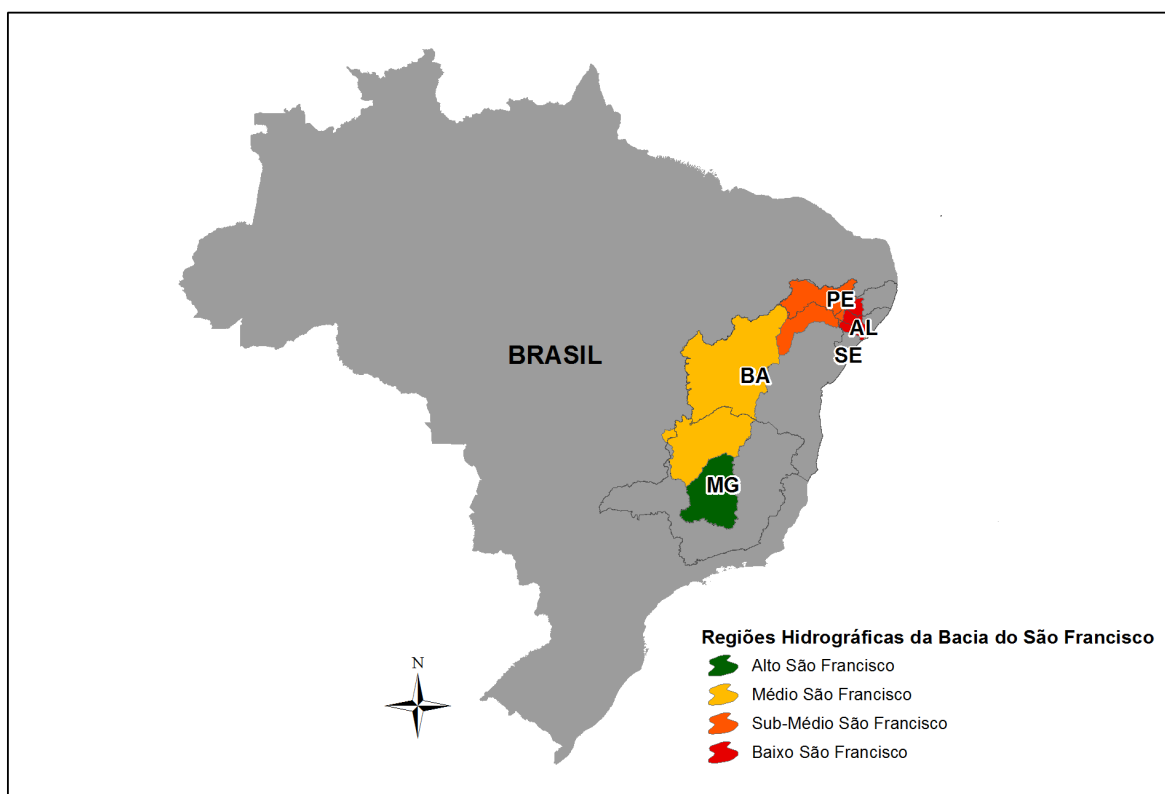


Figura 3.1: Regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco nos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe.

Reservatório da Usina Hidrelétrica de Três Marias

O reservatório de Três Marias foi construído para regular o fluxo do Rio São Francisco, controlar enchentes, possibilitar a navegação entre as cidades de Pirapora e Juazeiro e promover a criação de projetos de irrigação, sendo o primeiro empreendimento hidráulico de grande porte com múltiplas finalidades no Brasil (Brito, 2010; Cachapuz, 2006). A construção da barragem do reservatório iniciou em 1957 e foi concluída em 1961 (Figura 3.2, sendo um dos reservatórios mais antigos do Brasil e um dos maiores em termos de área inundada). O reservatório de Três Marias também é responsável pela produção de energia hidrelétrica que iniciou em 1962 e continua atualmente sob responsabilidade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), além dos usos já mencionados (CEMIG, 2014). O acesso à UHE de Três Marias, a partir de Belo Horizonte, é feito pela BR-040 no sentido Brasília e o trajeto possui aproximadamente 270 quilômetros. Algumas características da usina hidrelétrica estão descritas na Tabela 3.1.



Figura 3.2: Vista para a Usina Hidrelétrica de Três Marias. Fonte: CEMIG.

Tabela 3.1: Características da UHE de Três Marias.

Reservatório de Três Marias	
Municípios que margeiam	8
Comprimento da Barragem	2700m
Altura da Barragem	75m
Tipo	Terra homogênea
Cota de Coroamento	576,2m
Nível Máximo Operativo	572,5m
Unidades Geradoras	6 turbinas
Potência Instalada	396 Mega Watts

Adaptada de Cachapuz (2006).

3.2 Área do Espelho D'água

3.2.1 Método usado pela CEMIG

Para obter a área do espelho d'água do reservatório de Três Marias a CEMIG utiliza alguns métodos distintos entre si. Cabe ressaltar que as informações relacionadas ao reservatório estão em constante monitoramento e atualização.

Em agosto de 2010, a Agência Nacional de Águas (ANA) juntamente com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaboraram a Resolução Conjunta nº 3/2010 ¹ e

¹A Resolução ANA/ANEEL nº3 visa “estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pe-

buscando atender ao solicitado e atualizar as informações a respeito da curva de “cota \times área \times volume” do reservatório foi contratado serviço com previsão de entrega final de dados programada para a data do marco regulatório da Resolução.

Conforme comunicação pessoal com técnicos da Diretoria de Geração e Transmissão da CEMIG, a curva de “cota \times área e a de “cota \times volume” utilizada atualmente na operação do reservatório ainda é a gerada na época da sua construção, resultado de restituição topográfica do vale dos rios que constituem o reservatório. As cartas topográficas do vale do São Francisco, na escala 1 : 25.000 e com curvas de nível de 5 em 5 *m*, datadas de 1952, foram usadas para a obtenção da área do espelho d’água pela CEMIG.

A área do espelho d’água é gerada pela CEMIG através do polinômio de quarto grau da curva “Área \times Cota”, no qual a partir da cota (em metros) é possível calcular a área (em quilômetros quadrados) (Figura 3.3). Para a UHE Três Marias foram disponibilizados os parâmetros da curva original que compõe a equação 3.1. A equação mostra como a área pode ser obtida através da cota da superfície do reservatório em relação ao nível do mar.

$$Area_{Cota} = a + b(cota) + c(cota)^2 + d(cota)^3 + e(cota)^4 \quad (3.1)$$

Tabela 3.2: Coeficientes da Equação 3.1 para UHE Três Marias, fornecidos pela CEMIG.

Coeficiente	Valor
a	12075000
b	-89344
c	248
d	-0,3
e	0,0001

Recentemente, para atendimento à Resolução Normativa ANEEL n^o 501/2012², foi realizado um sobrevoo para levantamento aerofotogramétrico do reservatório. O trabalho foi realizado com o reservatório na cota 570,50*m* (87% de volume útil). A partir deste levantamento foi construído um modelo digital de terreno (MDT) da parte seca do reservatório, porém não foi atualizada a relação “cota \times área \times volume”.

Dois arquivos vetoriais do tipo *shapefile* foram gerados como produtos do levantamento realizado, o polígono da área do reservatório no nível máximo maximorum (573,4 *m*) e o polígono da área do reservatório no nível máximo operacional (572,5 *m*), ambos a partir do modelo digital de elevação.

los concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências”(ANA e ANEEL, 2010).

²A Resolução ANEEL n^o 501/2012 “*estabelece os procedimentos para o mapeamento dos bens imóveis e das áreas vinculados à concessão de usinas hidrelétricas*”.(ANEEL, 2012)

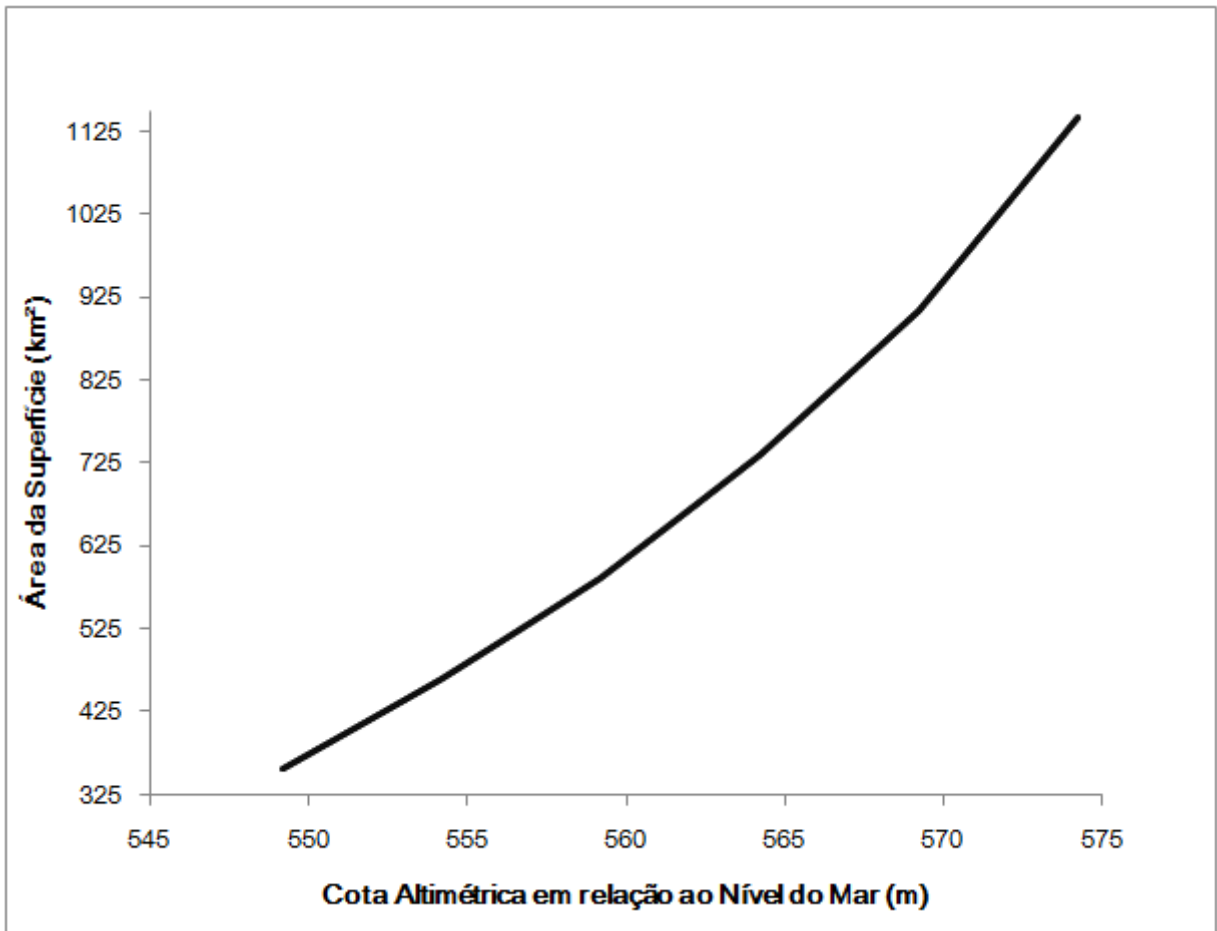


Figura 3.3: Gráfico da Curva Cota \times Área para a UHE Três Marias.

3.2.2 Processamento das imagens

Pré-processamento e Correções

As imagens Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ e Landsat 8 OLI foram selecionadas do catálogo disponível da USGS através do site *EarthExplorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) que permite que parâmetros de localização, data e quantidade de nuvens na cena sejam estipulados além de acessar o banco de dados das imagens dos satélites selecionados. No caso, a cobertura máxima de nuvens estipulada foi de 20% em toda a cena e se mesmo assim houvesse cobertura de nuvens na área do espelho d'água a cena foi descartada. Imagens do Landsat 7 ETM+ anteriores à falha do SLC foram utilizadas no trabalho para a construção de uma série temporal consistente.

Realizado o *download* das imagens, as bandas correspondentes ao Azul, Vermelho, Verde e Infravermelho (750-900nm e 1550-1750nm) foram combinadas em um único arquivo “.ers” no software ERDAS Imagine® e realizadas correções geométrica e atmosférica (Richter e Schläpfer, 2014).

A correção geométrica é um passo fundamental no pré-processamento de imagens de satélite, pois permite que as imagens sejam projetadas de forma a reduzir os efeitos das

distorções geométricas. As bandas combinadas foram reprojetaadas para coordenadas UTM Zona 23 Sul Datum WGS 84 (EPSG 32723)³ e corrigidas usando pontos de controle de uma imagem previamente corrigida obtida no catálogo online disponível no “Global Landcover Facility” também da USGS (USGS, 2003).

A correção atmosférica é essencial para melhorar os resultados dos algoritmos usados na classificação das imagens e também para permitir a comparação de imagens de diferentes datas de aquisição, uma vez corrigidos os efeitos atmosféricos as mudanças observadas nas imagens podem ser atribuídas somente a diferenças nos elementos da superfície (Nurlidiasari, 2004).

Melhoria na Definição das Áreas nas imagens LANDSAT

Fenômenos que podem ser representados geograficamente por dados de sensoriamento remoto possuem, em sua maioria, limites imprecisos e também heterogeneidade dentro de um mesmo fenômeno, devido a suas características particulares. Para esses, como é o caso da transição entre água e terra na delimitação da área do espelho d’água do reservatório, as técnicas de classificação rígida (*hard classification*), na qual o pixel pertence ou não a uma classe única, não atendem satisfatoriamente ao propósito já que é um fenômeno gradual. Para atender a esse tipo de caso, existe a classificação nebulosa (*fuzzy classification*), que considera o pixel como possuindo uma proporção de diferentes classes dentro dele (Jensen, 2005), para delimitação do espelho d’água, o pixel de borda é uma mistura que possui proporções diferentes de água e terra dentro dele mesmo. Considerando a lógica da classificação nebulosa, quanto maior a proporção de água dentro do pixel de mistura, mais pertencente à classe de água ele é, fazendo parte do que é considerado o espelho d’água.

Buscando melhorar o limite da borda do espelho d’água, foram feitos testes com imagens Landsat 5 TM e RapidEye (ver tabela 3.3). As cenas das imagens Landsat 5 TM possuem uma extensão maior que as cenas das imagens RapidEye, dessa forma as extensões correspondentes a cada cena RapidEye foram recortadas das cenas Landsat 5 TM para posterior comparação das áreas (Figura 3.4). As imagens Landsat 5 TM tiveram o tamanho do pixel alterado de 30 m para 5 m através de interpolação. A ideia do processo de interpolação de um pixel é separar melhor a proporção de “água” e de “não-água” dentro do mesmo pixel.

Tabela 3.3: Imagens RapidEye e Landsat 5 TM usadas no teste.

Satélite	Código da cena	Data
Landsat 5 TM	LT52190732010124CUB01	04/05/2010
RapidEye	2330413	06/05/2010
RapidEye	2330314	18/06/2010
RapidEye	2330415	18/06/2010
Landsat 5 TM	LT52190732010172CUB01	21/06/2010

³O Conjunto de Parâmetros Geodésicos EPSG (*EPSG Geodetic Parameter Dataset*), ou somente EPSG, é usado para: a) definir um sistema de referência de coordenadas (SRC) que garante que as coordenadas definem uma posição sem ambiguidade; b) definir as transformações e conversões para que coordenadas sejam alteradas de um SRC para outro (Misev *et al.*, 2012; IOGP, 2012). Cada SRC tem seu código específico.

O processo de classificação das imagens para o teste consistiu em utilizar a metodologia aplicada no trabalho de Abreu e Maillard (2014). A delimitação da área do espelho d’água do lago foi realizada usando o software eCognition® (Trimble, 2010). Como o objetivo da classificação é separar somente a superfície de água, somente duas classes foram criadas sendo “water” para água e “unclassified” para o restante da imagem.

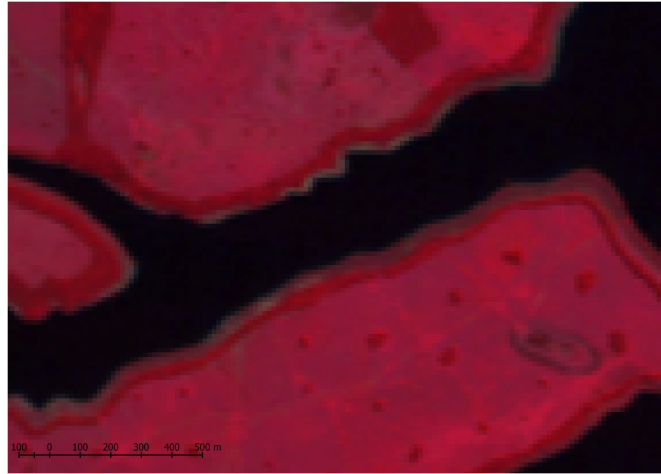
As imagens foram segmentadas usando o algoritmo “*multiscale*”, esse algoritmo considera regiões homogêneas e regiões adjacentes à primeira que sejam distintas de maneira significativa em relação às características colocadas a *priori* (Espindola e Câmara, 2007). A classe “water” foi designada para os objetos (segmentos) da imagem que atenderam às regras criadas usando valores da banda infravermelha do objeto. Foi acrescentado mais um refinamento na delimitação para incluir áreas de água que não haviam sido classificadas pela primeira regra mais restritiva, foi usada uma regra de relação de borda (“*relation to border*”) para garantir que os segmentos encontrados estão ligados ao reservatório, na qual os objetos deveriam possuir borda maior ou igual à 20% dos objetos classificados como “water”. Por fim, os objetos classificados como água na categoria “water” foram unidos em um objeto contínuo e exportado para um arquivo *shapefile*, alguns objetos que não pertenciam ao espelho d’água do reservatório foram deletados do *shapefile* resultante e a área do lago calculada. A banda do infravermelho próximo foi usada em outros estudos como a melhor banda espectral para separar água de terra firme (Jain *et al.*, 2005; Maillard *et al.*, 2012; Ji *et al.*, 2009), pela melhor resposta essa banda foi escolhida como referência para a delimitação.

As áreas resultantes como “água” após a classificação de todas as imagens foram comparadas. Percebeu-se que a imagem Landsat 5 TM com o pixel de 5 *m* apresentou delineamento da superfície de água com área maior que a obtida da imagem de pixel de 30 *m*, condizente com o resultado obtido através da classificação da imagem RapidEye, que apresentou os maiores valores de área de “água”.

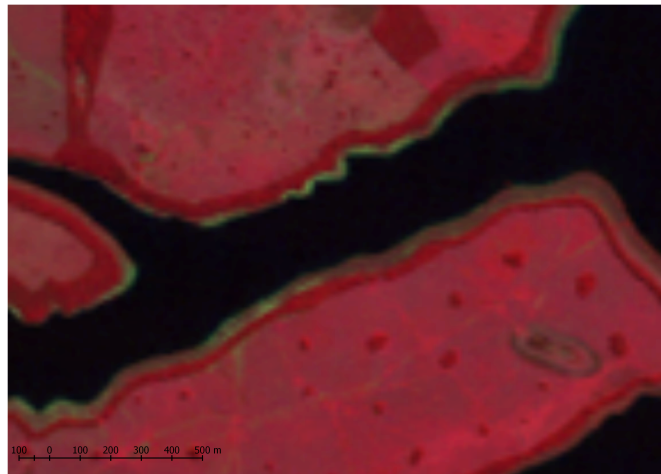
Tabela 3.4: Áreas obtidas no teste realizado com as Imagens Landsat e RapidEye

Data RapidEye	Data Landsat 5 TM	RapidEye	Landsat 5 <i>m</i>	Landsat 30 <i>m</i>
06/05/2010	04/05/2010	50,24km ²	49,15km ²	47,12km ²
18/06/2010	21/06/2010	63,29km ²	62,5km ²	61,88km ²
18/06/2010	21/06/2010	25km ²	24,76km ²	24,65km ²

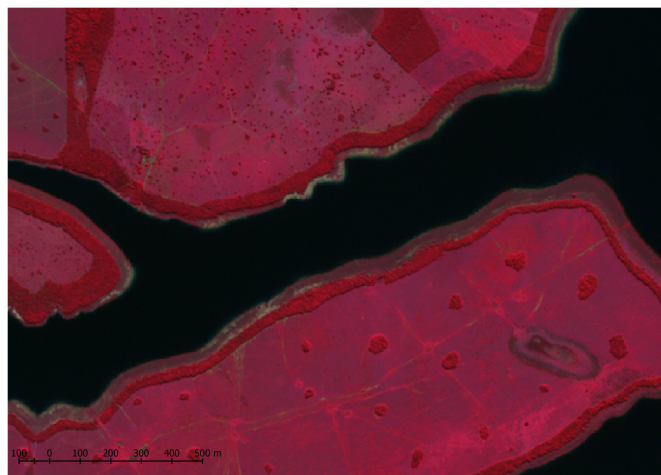
Assim sendo, as imagens com pixel de 30 *m* usadas no trabalho foram interpoladas para pixel de 5 *m* para que a área do espelho d’água do reservatório seja o mais próximo o possível da realidade, separando o conteúdo do pixel de mistura que ocorre no limite do espelho d’água para melhor classificação.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4: Detalhe das imagens de teste em composição “falsa cor”: a) e b) Landsat 5 TM 04/05/2010, pixel de 30 m e 5 m, respectivamente; c) RapidEye 2330413, 06/05/2010.

Delimitação da Área do Lago

As cenas Landsat selecionadas passaram por uma segunda inspeção visual e as que ainda possuíam nuvens nas áreas de borda e sobre o espelho d'água, de modo a impedir a visualização do limite entre a água e terra, foram descartadas. Ao final da seleção restaram 73 imagens, das quais 41 imagens Landsat 5 TM, 13 imagens Landsat 7 ETM+ e 19 imagens Landsat 8 OLI. Todas as cenas foram recortadas para otimizar o tempo de processamento passando do tamanho original de aproximadamente 170 x 185 quilômetros (N-S x E-W) para um tamanho aproximado de 105 x 82 quilômetros (N-S x E-W) (Figura 3.5). O recorte foi baseado em um buffer de 900 metros a partir do limite do espelho d'água obtido para a imagem do dia 4 de Julho de 2009 usando o procedimento descrito na metodologia de Abreu e Maillard (2014), já mencionado na Seção 3.2.2.

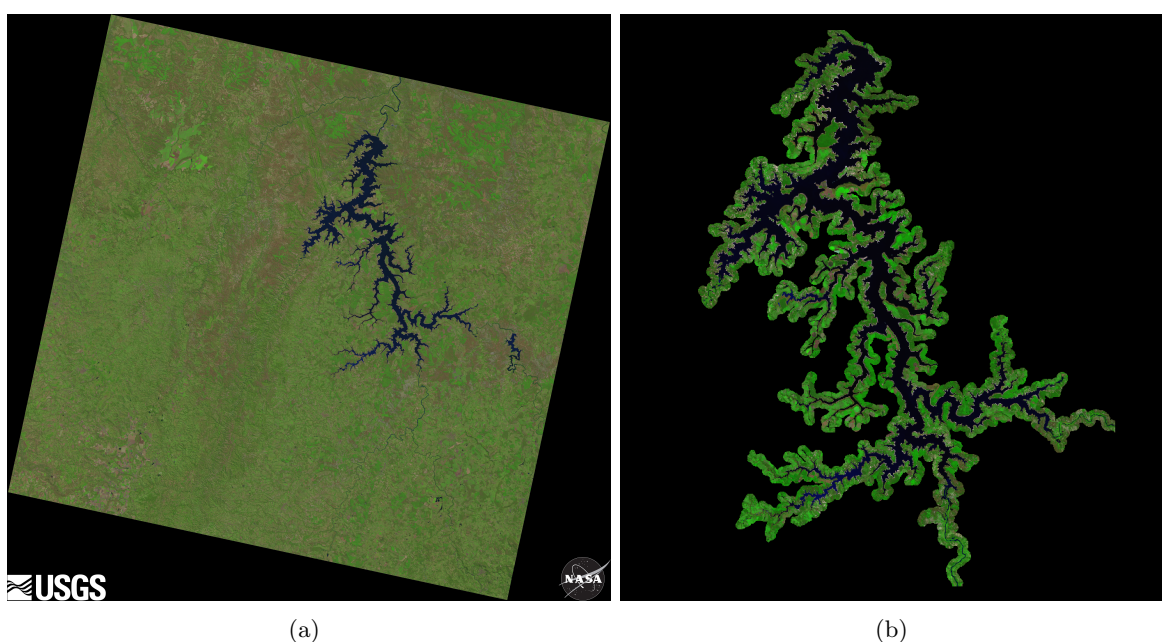


Figura 3.5: Imagem Landsat 8 OLI do dia 12/05/2013: a) extensão total da cena; b) recorte utilizado para a classificação do Reservatório.

A água, quando profunda e sem a ocorrência de matéria orgânica e sedimentos em suspensão, tem um comportamento espectral na faixa do infravermelho (750 nm a 3000 nm) em que absorve praticamente toda a radiação incidente aparecendo preta ou extremamente escura nas imagens (Jensen *et al.*, 2009). Devido a esse comportamento na faixa do infravermelho, as bandas referentes a esses comprimentos de onda (λ) foram selecionadas para a classificação das feições referentes ao espelho d'água do lago.

O processo de classificação das imagens Landsat corrigidas da região do reservatório de Três Marias consistiu em utilizar a faixa espectral do infravermelho no λ 1550-1750 nm para os sensores Landsat TM e ETM+ (banda 5) e λ 1570-1650 nm para o sensor Landsat OLI (banda 6), optou-se por essa faixa espectral devido a melhor resposta apresentada quando o objetivo é separar água das demais feições na imagem (Maillard *et al.*, 2012; Ji *et al.*, 2009;

Xu, 2006).

A banda do infravermelho escolhida, nas 73 imagens, teve os valores de reflectância adaptados para o intervalo entre 0 e 255 e foi estabelecido um limiar para o que seria considerado água e o que seria considerado “não-água” a partir de valores de pixel localizados nas zonas de transição entre a água e a margem do reservatório. Os pixels com valores maiores que zero e menores ou igual a 25 foram classificados como água e os demais com valores maiores que 25 foram considerados “não-água”. A classificação das imagens foi feita usando o editor de fórmula do ER Mapper® no qual a seguinte expressão condicional (Equação 3.2) foi usada:

$$IF(input1 > 0 \text{ and } input1 \leq 25) \text{ then } 1 \text{ else } 0 \quad (3.2)$$

O resultado da aplicação da fórmula nas imagens foi um raster binário com valores de pixel 0 e 1, cada arquivo foi poligonizado no QGIS Lyon (QGIS Development Team, 2015) gerando um arquivo *shapefile* (.shp) para cada data. Os *shapefiles* foram editados deletando os polígonos correspondentes a feições “não-água” e os polígonos correspondentes a feições de água restantes tiveram suas áreas calculadas em quilômetros quadrados e somadas.

3.3 Dados de altimetria

3.3.1 Nível local (*in situ*)

Foi publicada em outubro de 2010 a Resolução Conjunta ANA ANEEL n^o 03, que orienta concessionárias e empresas autorizadas de geração hidrelétrica sobre a coleta, armazenamento e tratamento dos dados hidrométricos coletados nas estações de monitoramento hidrométrico e como estes devem ser enviados para o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da ANA.

Tradicionalmente o nível d’água de reservatórios é medido localmente em estações localizadas em pontos estratégicos como encontro com rios, pontes e/ou barragens (ANA, 2009). A CEMIG opera a estação do reservatório de Três Marias, nomeada UHE Três Marias Barramento, e nela são feitos dois tipos de monitoramento: limnimétrico e pluviométrico. O monitoramento limnimétrico refere-se aos dados do nível d’água do reservatório e o pluviométrico aos dados de precipitação.

Os dados referentes à estação UHE Três Marias Barramento foram fornecidos pela CEMIG mediante pedido por carta protocolada na sede da empresa.

Medição tradicional de nível d’água (cotas)

Existem dois tipos de estações de monitoramento hidrométrico, estações convencionais e estações telemétricas automáticas. As estações convencionais são o modo mais simples de medir o nível d’água. Réguas verticais de um metro, com gradação em centímetros, chamadas régua limnimétrica são instaladas colocadas junto à margem. Para que as medições tenham qualidade, as régua são niveladas usando-se um *datum* de referência. As régua limnimétricas, em sua maioria, são placas de metal inox fixadas de maneira sempre haver um

desses elementos em contato com a água, até mesmo quando o nível d'água está excepcionalmente baixo (Tucci, 2001). As estações telemétricas são as cujos dados são coletados de forma automática pelos sensores instalados e transmitidos de forma remota para um banco de dados.

A estação hidrometeorológica operada pela CEMIG está localizada no barramento da UHE de Três Marias ($18^{\circ}12'54''\text{S}$, $45^{\circ}15'33''\text{W}$) na margem direita, à esquerda do vertedouro. O monitoramento limnimétrico começou a ser realizado em Agosto de 1981 através de réguas limnimétricas de alumínio e limnígrafo da marca IKEDA KEIKI modelo MV-200WPD-10. A disposição das réguas em relação a barragem está ilustrada na Figura 3.6.

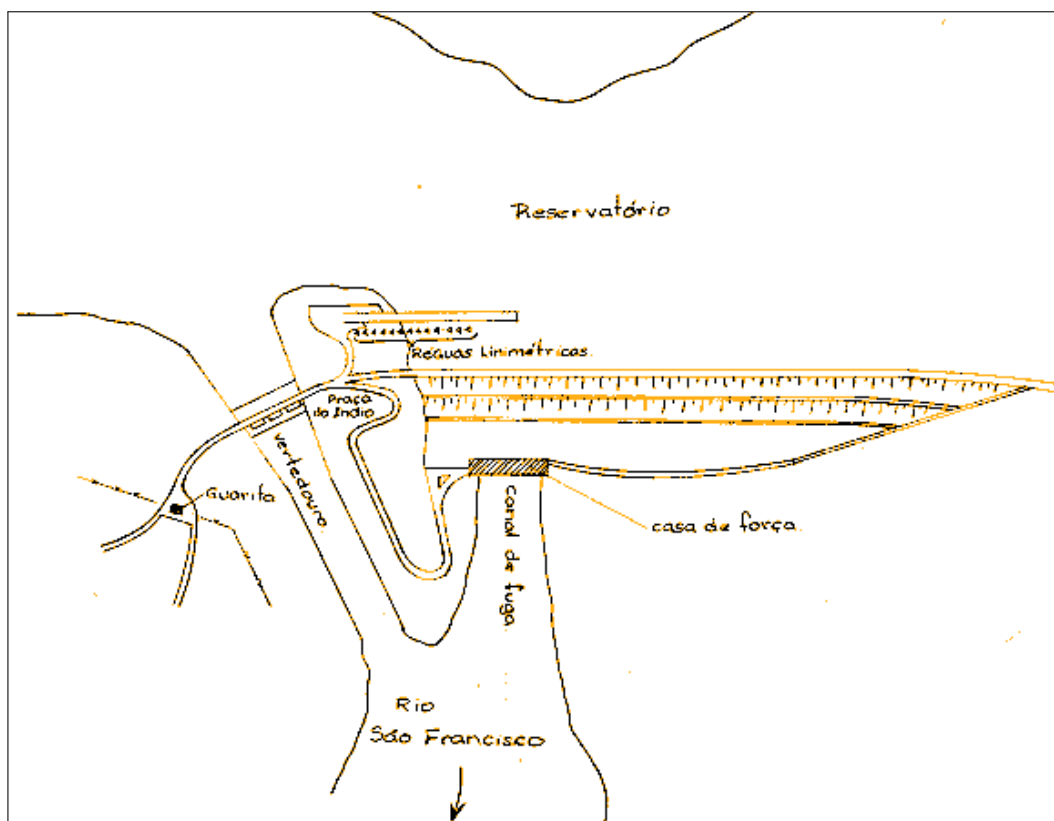


Figura 3.6: Croqui de localização da Estação de Monitoramento UHE Três Marias Barramento. (Elaborado por Fábio Magno, CEMIG, Agosto de 2014)

Existem duas referências de nível marcadas por parafusos de ferro chumbados em blocos de concreto em local estável, a primeira referência marca a cota referente a 574,051 metros e a segunda 575,208 metros (Figura 3.7). As réguas limnimétricas de alumínio estão fixadas em estacas de suporte de madeira com espaçamento de metro em metro, desde a cota de 552m até 576m, em 24 lances de escada (Figura 3.8).

O nível d'água também é registrado automaticamente na estação com o uso de um limnígrafo de boia e contrapeso instalado próximo aos lances de escada (Figura 3.9). O equipamento grava continuamente as mudanças do nível d'água e seu funcionamento é baseado em uma boia fixada a um cabo, passando sobre uma roldana com um contrapeso na

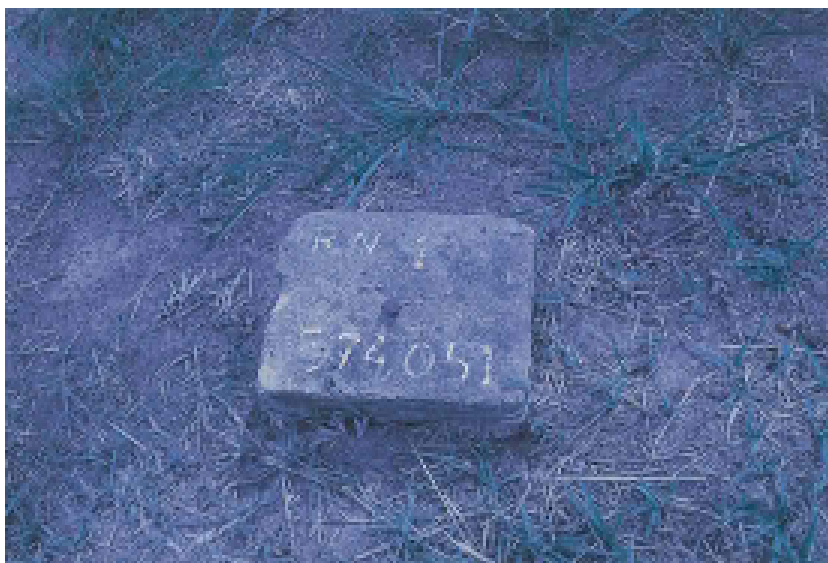


Figura 3.7: Referência de Nível 1 presente na Estação de Monitoramento UHE Três Marias Barramento. (Foto fornecida pela CEMIG, sem data)



Figura 3.8: Fotos das réguas limnimétricas na estação de monitoramento. (Fotos fornecidas pela CEMIG, Dezembro de 2014)

outra extremidade do cabo. Esse equipamento é colocado dentro de uma estrutura tipo poço que se comunica com o reservatório. A boia ao flutuar acompanha o nível, fazendo a roldana girar no eixo que está conectado ao mecanismo de gravação, registrando a cota.



(a)



(b)

Figura 3.9: Estrutura das instalações do Limnógrafo. (a) Parte interna da estação de monitoramento; (b) Parte externa da estação. (Fotos fornecidas pela CEMIG, Agosto de 2015)

3.3.2 Altimetria por Radar

Os dados de altimetria produzidos por sensores a bordo de satélites e produtos derivados desses dados estão disponíveis para o público em algumas plataformas online. Os dados usados no estudo, produzidos pelos sensores a bordo do SARAL e Envisat foram adquiridos dessa maneira. Os arquivos com os dados produzidos pelo RA-2 do Envisat são obtidos através da base de dados do *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère* (CTOH), que permite ao usuário registrado a escolha de quais parâmetros, qual período e qual a área de interesse. Os dados do SARAL/AltiKa são obtidos através do banco de dados disponível online AVISO+ (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*).

Ambos os satélites compartilham a mesma órbita e ciclos de revisita para dois períodos de

tempo diferentes, sendo o Envisat de Março de 2002 a Outubro de 2010 e o SARAL de Março de 2013 até o presente. O sensor RA-2, a bordo do Envisat utiliza a banda Ku com frequência de 13,57 GHz e também um canal secundário na banda S de 3,2 GHz para estimar erros de medição na extensão causados pela propagação das ondas na ionosfera. Já o sensor AltiKa, a bordo do SARAL opera somente com a banda Ka com uma frequência de 35,75 GHz (Baker *et al.*, 2002; Bronner *et al.*, 2013). Como houve uma mudança de órbita no Envisat em 2010, não foram obtidos dados utilizáveis para a região do reservatório de Três Marias nos anos de 2011 e 2012, somente os dados da órbita original do Envisat foram usados no trabalho.

Dados de altimetria por radar orbital para hidrologia são de difícil processamento se não for aplicada uma ferramenta de análise, para tanto foi desenvolvida a aplicação SWGTOOL (Maillard *et al.*, 2015) usando o ambiente Python 2.7. Python é uma linguagem de programação interpretada que permite que contribuições ao código da aplicação sejam feitas, já que é uma linguagem muito usada para aplicações de código aberto. O SWGTOOL pode ser usado para extrair dados de altimetria para lagos ou rios, dependendo da necessidade do usuário.

Os dados de altimetria por satélite necessitam uma série de procedimentos de correção e pré-processamento. Os parâmetros que são aplicados ao fazer esses procedimentos são fornecidos junto com os dados quando o pedido dos mesmos é realizado junto ao CTOH e o AVISO+. O princípio da altimetria apresentado brevemente na Seção 2.1.2 está esquematizado na Figura 3.10.

A altitude da superfície é o resultado da diferença entre a altitude do satélite α_s com a amplitude ρ do pulso emitido, e suas correções considerando os fenômenos atmosféricos que retardam a propagação pulso sendo estes as variações da ionosfera (*iono*), pressão (troposfera sem umidade: *dry*) e umidade (troposfera úmida: *wet*); também são consideradas as variações de maré polar (*pt*)⁴ e da superfície terrestre (*set*) que geram movimentações crustais verticais. Para que a altitude final seja relativa ao Datum do geoide e não ao elipsoide, é aplicada mais uma correção (fator *GC* na Equação 3.3; Maillard *et al.*, 2015).

$$H_w = \alpha_s - (\rho + \textit{iono} + \textit{dry} + \textit{wet} + \textit{pt} + \textit{set}) + \textit{GC} \quad (3.3)$$

As especificações da órbita de cada missão de satélite determinam a resolução temporal, localização e densidade espacial das rotas em solo. No caso do reservatório de Três Marias duas rotas referentes às órbitas antiga e atual do Envisat e do SARAL cruzam a superfície do lago (ver Figura 3.11) (Ričko *et al.*, 2012). Foram selecionados doze pontos na rota (track) correspondente à órbita antiga do Envisat e do SARAL onde cruzam a superfície do lago do reservatório mesmo na menor área registrada através das imagens, cada ponto desses representa uma estação virtual de monitoramento (Estação SWG) e para cada par de

⁴De forma simplificada a maré polar pode ser explicada como a variação na deformação dos polos da Terra de acordo com os ciclos de nutação. A movimentação polar pode ser descrita como duas variações harmônicas da localização do polo de rotação instantâneo em relação ao polo de rotação médio: movimento elíptico de período anual, e um movimento quase circular em um período de 14 meses. O potencial centrífugo aumentado associado com essa movimentação polar é referida como maré polar potencial, e as deformações resultantes são chamadas de maré polar. Para melhor compreensão do conceito ver Desai (2002).

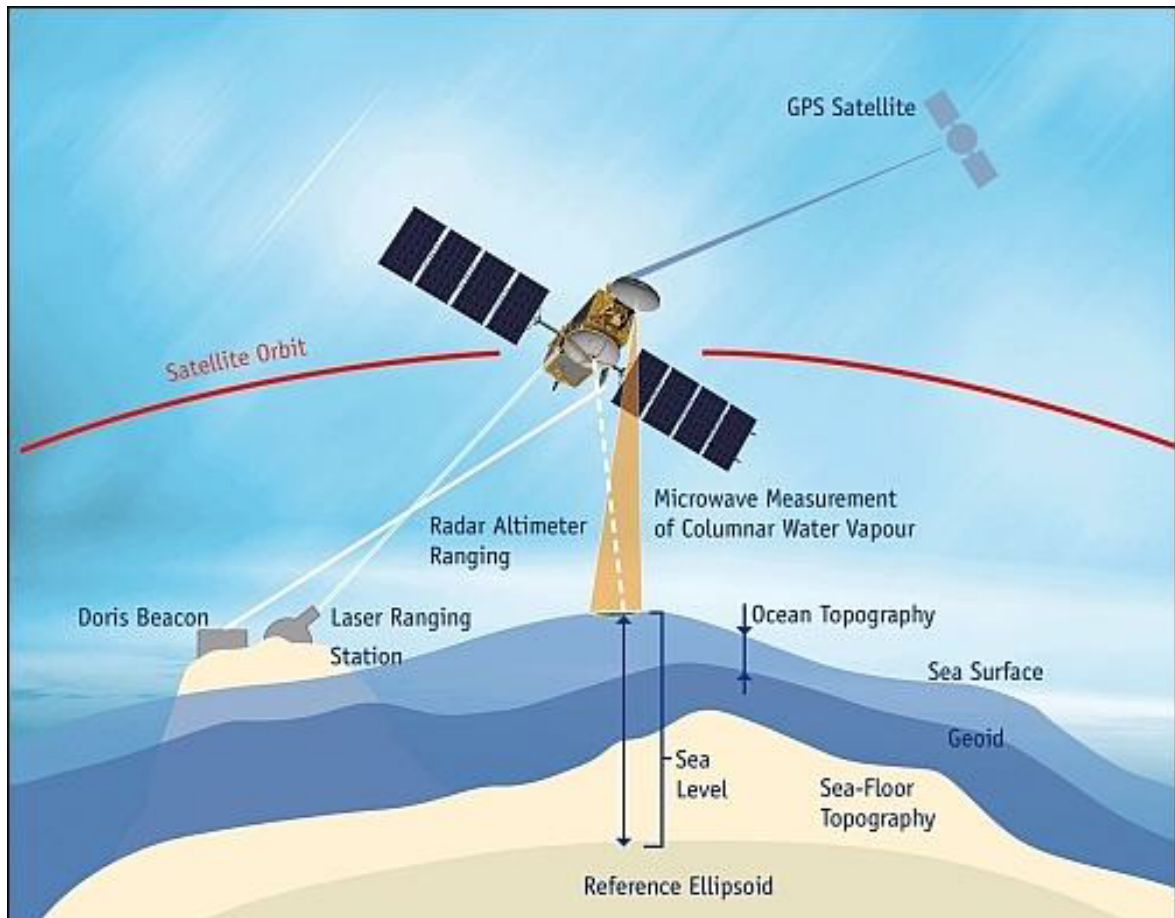


Figura 3.10: Princípio da altimetria por radar a bordo de satélite. (Fonte: Sulistioadi (2013))

coordenadas foi aplicado na extração dos dados de altimetria um valor de correção para o geóide calculado através do aplicativo disponível pelo IBGE *MAPGEO2010*⁵ (Tabela 3.5).

As coordenadas dos pontos de coleta dos dados do satélite servem de referência para o SWGTOOL extrair o nível da água dentro de um limite predeterminado pelo usuário, usando também os limites dados para a margem da represa em um arquivo tipo *shapefile* “.shp” para selecionar as medições compreendidas entre duas linhas (que representam as margens) que indicam a superfície considerada como espelho d’água (Maillard e Calmant, 2013). Em versões anteriores do SWGTOOL, o programa considerou em alguns casos medidas entre duas linhas do *shapefile* que não correspondiam à superfície de água, mas sim à margem do lago. A Figura 3.12a mostra essa situação e a Figura 3.12b mostra a saída gráfica dos pontos de altimetria gerados pelo SWGTOOL.

⁵O aplicativo está disponível em ftp://geoftp.ibge.gov.br/aplicativos/sistema_interpolacao_ondulacao_geoidal/.

Tabela 3.5: Coordenadas das Estações SWG e Valor de Correção do Geóide

Estação SWG	Coordenadas	Valor do Geóide
1	-18.871;-45.195	-10.19
2	-18.700;-45.235	-10.39
3	-18.637;-45.250	-10.47
4	-18.566;-45.267	-10.56
5	-18.501;-45.282	-10.59
6	-18.437;-45.298	-10.6
7	-18.411;-45.304	-10.67
8	-18.387;-45.310	-10.72
9	-18.332;-45.322	-10.73
10	-18.309;-45.328	-10.72
11	-18.247;-45.343	-10.73
12★	-18.817;-45.048	-10.15

★ A estação possui o sentido da órbita descendente, as demais possuem sentido ascendente.

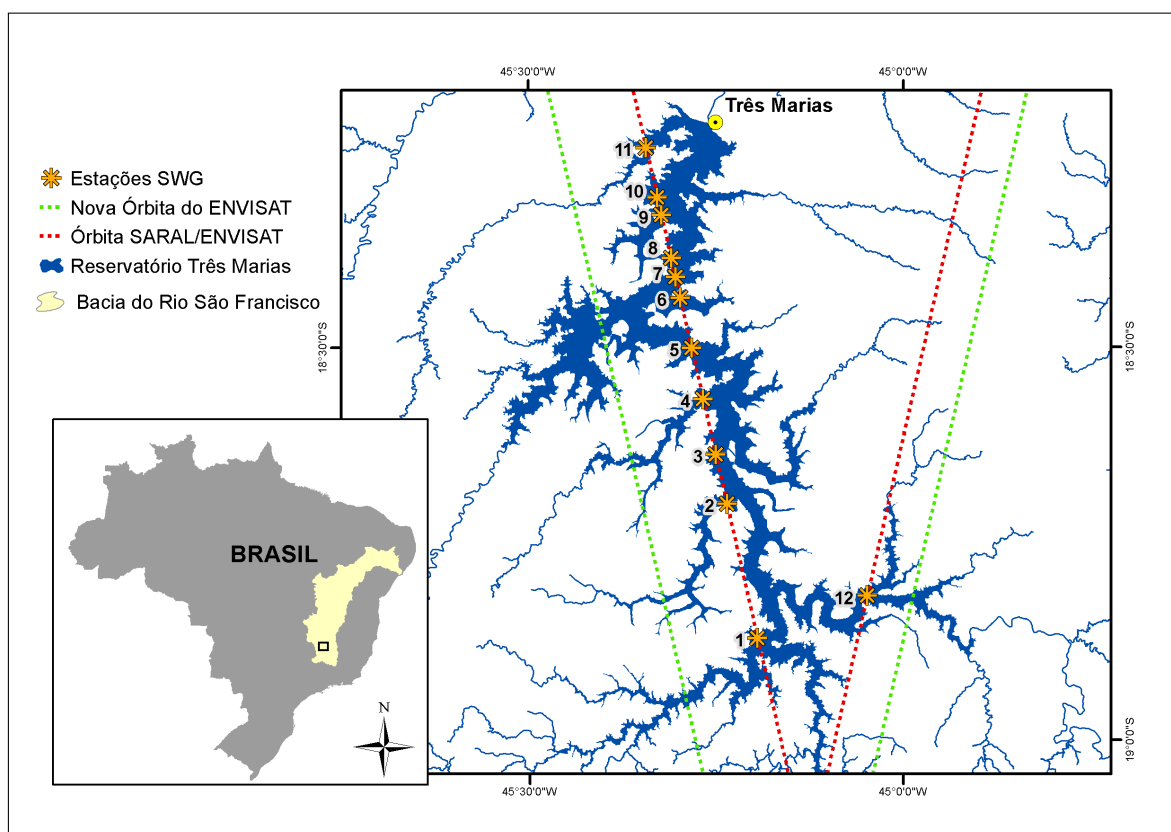
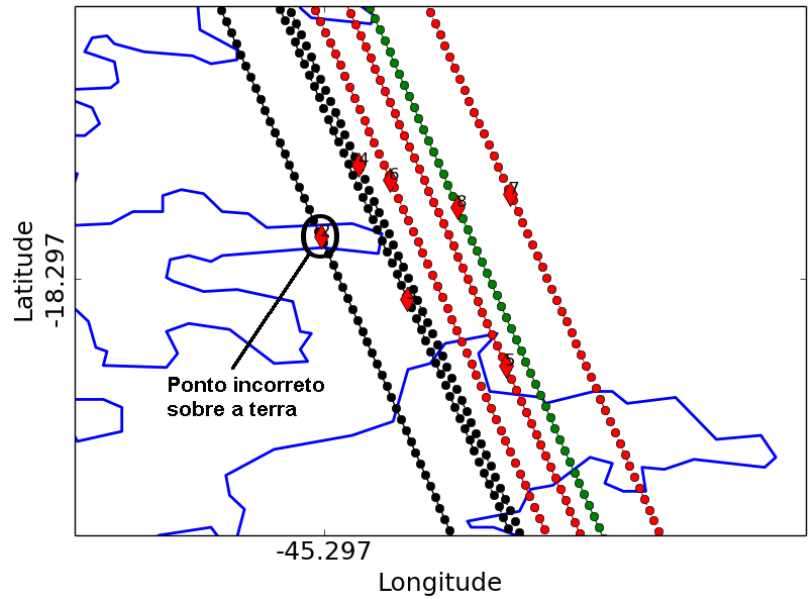
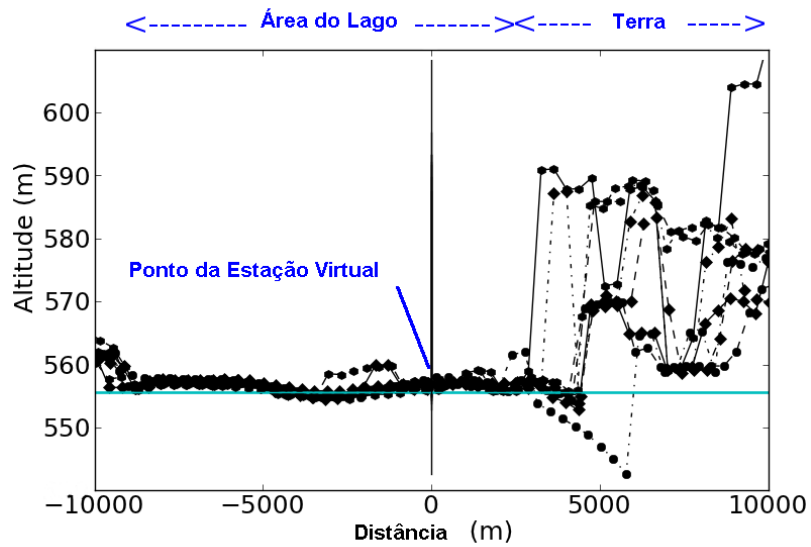


Figura 3.11: Localização das Estações SWG selecionadas na órbita referente ao SARAL e Envisat.



(a)



(b)

Figura 3.12: Ilustração da saída gráfica do SWGTOOL: a) Tracks próximas ao ponto da Estação SWG 9, os dados são referentes aos ciclos 2 a 8 do SARAL em 2013. O ponto de número 2 está localizado fora da superfície de água do lago porém entre duas linhas do *shapefile*; b) pontos de altimetria de sete tracks diferentes usados para fazer a média do nível de água.

3.4 Volume do Reservatório

3.4.1 Método usado pela CEMIG

O volume útil da UHE Três Marias é obtido através da curva de “cota \times área \times volume” gerada na década de 1960, e já mencionada na seção 3.2.1.

A partir do volume de armazenamento do reservatório (em hm^3 , hectômetros cúbicos) pode-se calcular a cota da superfície do reservatório em relação ao oceano. A equação 3.4 mostra como o nível, ou cota, da superfície do reservatório pode ser calculada a partir do volume e quais os parâmetros usados para aplicação da equação no reservatório da UHE Três Marias.

$$Cota_{Volume} = a + b(Volume) + c(Volume)^2 + d(Volume)^3 + e(Volume)^4 \quad (3.4)$$

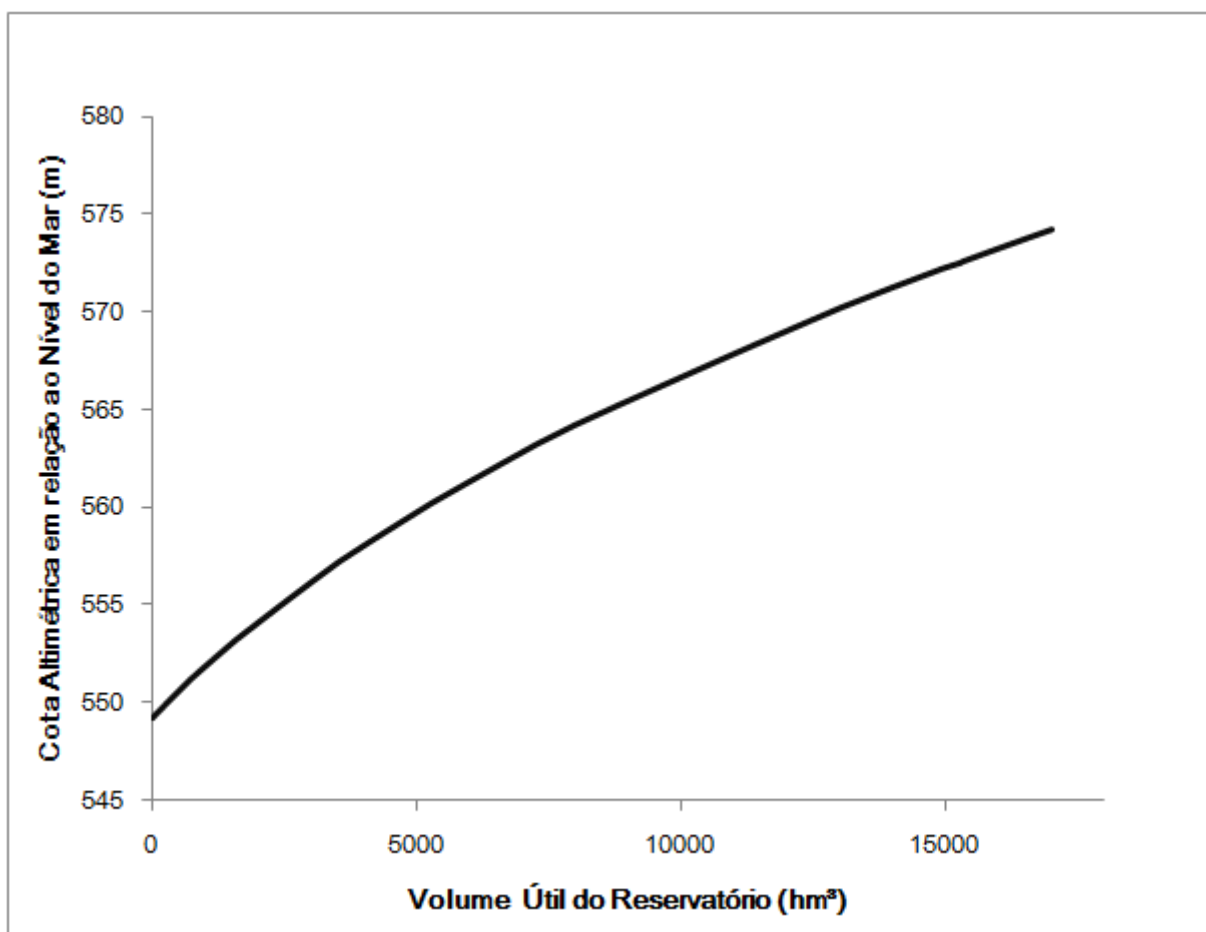


Figura 3.13: Gráfico da Curva Volume \times Cota para a UHE Três Marias.

O volume útil do reservatório com o menor valor na série de dados da CEMIG utilizada é o de $397 hm^3$, na cota de $550,2920 m$. Para o cálculo da variação do volume entre as datas esse valor é tido como o valor de base, equivalente ao zero, sendo subtraído dos demais valores de volume fornecendo assim o $\Delta Volume_{in situ}$.

Tabela 3.6: Coeficientes da Equação para UHE Três Marias

Coeficiente	Valor
a	530
b	0,006
c	$-5 \cdot 10^{-7}$
d	$2 \cdot 10^{-11}$
e	$-4 \cdot 10^{-16}$

3.4.2 Dados de Sensoriamento Remoto

Para obter a variação de volume do reservatório entre duas datas distintas, d_1 e d_2 , nas quais tem-se dados gerados a partir de sensoriamento remoto foi calculada primeiro a variação do nível das cotas entre duas datas (Equação 3.5).

$$\Delta\text{Nível} = \text{nível}(d_1) - \text{nível}(d_2) \quad (3.5)$$

A partir do valor de $\Delta\text{Nível}$ foi usada a Equação 3.6 para calcular a variação do volume do reservatório. Foi usada essa equação para obtenção do volume, uma vez que a forma dendrítica do reservatório da UHE Três Maria faz com que a relação de aumento das áreas entre dois níveis diferentes seja praticamente linear. A equação da variação do volume pode ter dados de valor do nível tanto obtidas através do SWG quanto *in situ*, assim como valores de área obtidos pelas imagens Landsat quanto fornecidos pela CEMIG.

$$\Delta\text{Volume} = \Delta\text{Nível} \times \frac{\text{Área}(d_1) + \text{Área}(d_2)}{2} \quad (3.6)$$

Por fim, foram usadas variações de volume:

- $\Delta\text{Volume}_{CEMIG}$ - dados da curva “cota \times área \times volume” da CEMIG para a UHE Três Marias.
- $\Delta\text{Volume}_{Misto}$ - dado da $\Delta\text{Nível}$ obtido pelo SWG e área gerada pelo modelo; dado da $\Delta\text{Nível}$ obtido pelo modelo e área gerada pelas imagens Landsat.
- $\Delta\text{Volume}_{SWG}$ - dado de $\Delta\text{Nível}$ obtido pelo SWG e área gerada pelas imagens Landsat.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados gerados a partir da metodologia descrita no capítulo anterior e suas discussões, além do modelo que determina a variação de volume no reservatório da UHE de Três Marias.

4.1 Áreas

A área do espelho d'água do reservatório de Três Marias nas imagens Landsat utilizadas variou bastante considerando o período de 2000 a 2015. Os dez menores valores de área ocorreram nos anos de 2001, 2014 (8 valores) e 2015, o valor mais baixo ocorreu em Novembro de 2014 (ver Tabela B.1). Já os dez maiores valores ocorreram nos anos de 2004 a 2009, e 2011, sendo o maior valor registrado em Abril de 2008.

Os valores de área apresentados são consistentes com as medidas de nível de água dos últimos anos e as medições da estação *in situ* mostram níveis muito baixos, em Novembro de 2014 o reservatório de Três Marias estava com menos de 3% da capacidade total (http://www.ons.org.br/resultados/_operacao/boletim/_diario/).

O método de classificação para obter a área de água foi bem sucedido ao separar o objeto de interesse do restante da imagem, mostrando que o uso da banda infravermelha devido ao comportamento da água nessa faixa é a melhor opção (Ji *et al.*, 2009). As áreas obtidas através da classificação das imagens Landsat com pixel de 30 m e com pixel interpolado para 5 m mostraram valores diferentes entre si para todas as datas. Os valores das áreas obtidas nas datas cujo nível da represa dado pela curva da CEMIG foi igual ou maior que 570,55 m teve o valor da área de pixel de 30 m menor que a área de pixel de 5 m (diferença negativa), já os valores obtidos com o nível menor ou igual a 570,52 m tiveram a área das imagens de pixel de 30 m maior que as imagens de pixel de 5 m (diferença positiva).

A média dos erros absolutos entre as áreas obtidas pelas imagens Landsat e os valores dados pela CEMIG foi de 9,9 km² e 14,91 km² para as Áreas de 30 m e 5 m, respectivamente.

4.2 Nível

A aplicação SWGTOOL foi usada para produzir as medidas de nível de água em doze pontos diferentes na órbita correspondente ao Envisat e ao SARAL (ver Tabela 3.5).

A partir das medidas de nível obtidas, foi calculada a declividade para a sequência das estações 1 a 11 a fim de verificar se existe uma tendência nas medidas mais Norte possuírem valores mais baixos. A distância entre o ponto mais ao Sul (Estação SWG 1) e o mais ao Norte (Estação SWG 11) é de 69 quilômetros, verificou-se que os valores de declividade obtidos para as medidas foram insignificantes para essa distância e não demonstraram nenhum padrão ou comportamento típico. O coeficiente de determinação (R^2) obtido mostrou a relação extremamente baixa entre os níveis e o a longitude do ponto do qual pertencem. A seguir são mostrados os valores de nível para a data do dia 16/10/2002 com dados do Envisat, a título de exemplo da variação entre estações. O cálculo da declividade foi feito para todas as datas nas quais haviam dados SARAL e Envisat disponíveis.

Tabela 4.1: Estações SWG e níveis do dia 16/10/2002, obtidos através dos dados Envisat.

Estação SWG	Nível
1	560,96
2	561,53
3	561,54
4	561,33
5	560,98
6	561,39
7	561,30
8	561,21
9	560,86
10	560,48
11	561,20

- Variação de declividade a cada quilômetro: 0,000005 m/km
- R^2 : 0,1086

Para efeito de análise dos dados, como há somente um valor de medição de nível *in situ* para cada data e doze valores diferentes de medição por satélite, foi calculada a média desses valores que foi usada como valor final do nível SWG nas análises.

Os primeiros três ciclos do SARAL apresentaram problemas de aquisição e acarretaram em precisão muito baixa, estes ciclos (Março a Maio, 2013) foram descartados. Outras medições resultantes apresentaram valores discrepantes e foram eliminadas dos cálculos.

Quando são comparados os níveis obtidos dos satélites e os níveis medidos *in situ*, pode-se observar um desvio sistemático de $\approx 0,56$, que foi posteriormente subtraído dos dados de altimetria dos satélites. Essa diferença foi menor que a diferença de $\approx 1,33$ encontrada

anteriormente nos resultados do trabalho de Abreu e Maillard (2014). Essa melhoria nos resultados pode ser atribuída a ajustes realizados no programa SWGTOOL, que anteriormente gerava erros que podiam ser atribuídos aos seguintes fatores:

1. O elipsoide usado pelo Envisat e pelo SARAL possui uma diferença de 70 *cm* em relação ao GRS80 (comunicação pessoal com Stéphane Calmant).
2. Foi relatado que o retracker Ice1 (usado no estudo) possui um desvio entre 60 a 85*cm* (Crétau *et al.*, 2009).
3. Uma diferença de 10 *cm* entre o datum EGM96 usado pelo Envisat e pelo SARAL e o datum Imbituba usado pela CEMIG foi notada (Luz, 2002).
4. Outras fontes de erro no processo de correção dos dados.

Após subtrair a diferença sistemática dos dados de satélite, foi encontrado um erro médio quadrático (RMSE) de 0,70 *m*, maior do que foi previamente encontrado de 0,24*m*. Esse aumento no RMSE pode ter ocorrido devido ao aumento do número de medições que antes eram 9 e passaram a ser 102, uma vez que quanto mais medidas usadas, maior o erro que pode ser encontrado (Tabela C.1). Considerando que as medições de nível dos satélites e *in situ* não foram realizadas simultaneamente, o erro é considerado satisfatório tanto quanto o encontrado em outros estudos similares (Calmant e Seyler, 2006; Da Silva *et al.*, 2010; Da Silva *et al.*, 2012; Maillard e Calmant, 2013). Calculando separadamente o RMSE para os dados de nível de cada um dos satélites, Envisat e Saral, foram obtidos valores diferentes (ver Tabela 4.2). O Saral apresentou dados de nível com valores mais próximos dos medidos *in situ*, tendo um erro médio cerca de 0,02 *m* menor que o do Envisat. Após os cálculos foi elaborado o gráfico da série temporal tanto para os dados das Estações SWG quanto dos dados da CEMIG (Figura 4.1).

Tabela 4.2: Valor do erro médio entre as medidas *in situ* e por satélite e erro médio quadrático para os dados de cada satélite.

Satélite	Quantidade de Datas	Erro Médio	RMSE
Envisat	83	0,567	0,774
Saral	19	0,547	0,295
Total	102	0,563	0,708

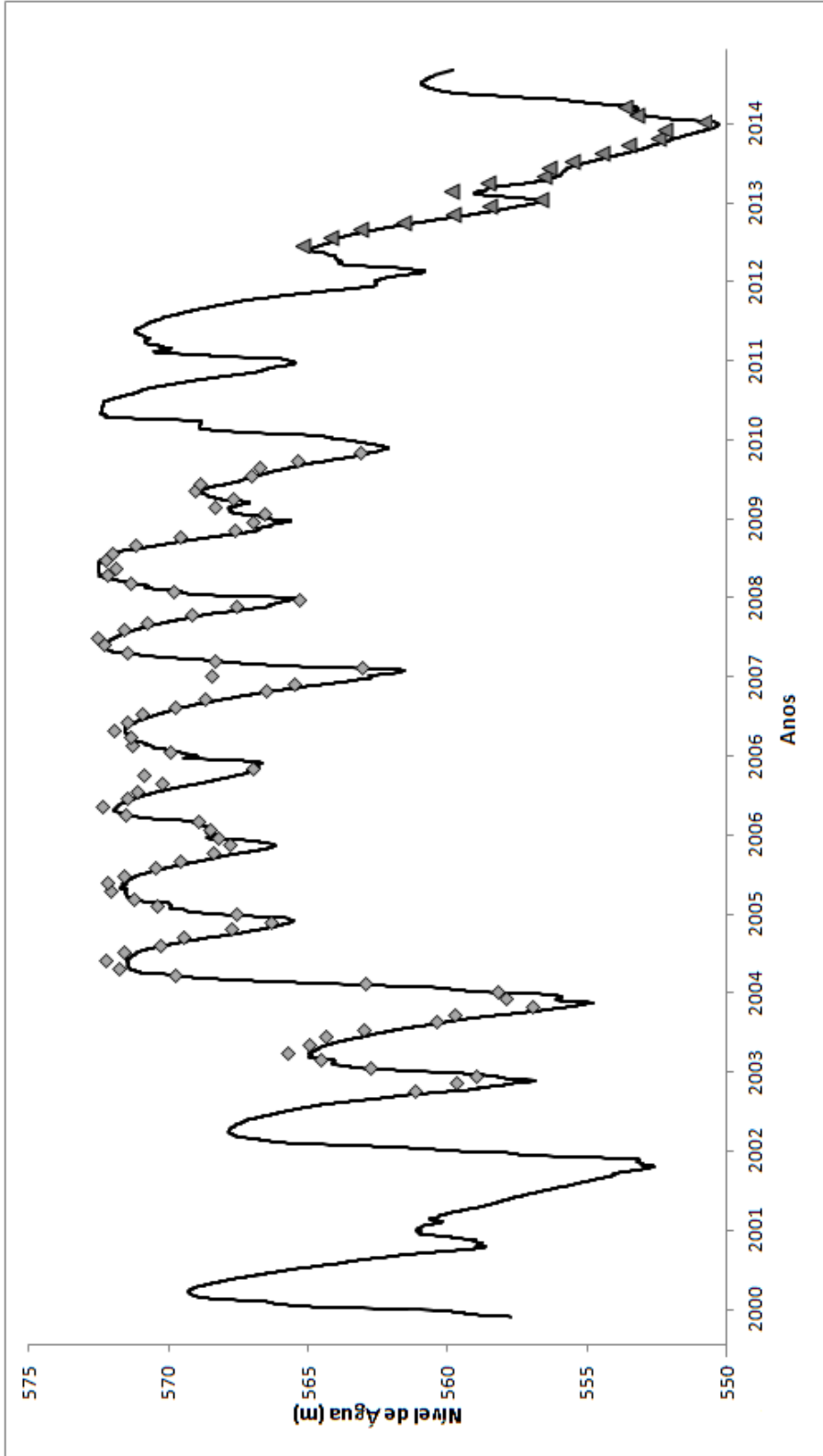


Figura 4.1: Série temporal do nível do reservatório de Três Marias entre 2000 e 2015 de acordo com dados *in situ* da CEMIG. Os losangos mostram os níveis de água calculados com dados Envisat e os triângulos mostram os níveis calculados com dados SARAL.

4.3 Relação entre Nível, Área e Mudança de Volume

Foram selecionadas as datas de aquisição das imagens Landsat mais próximas à passagem dos satélites de altimetria, colocadas na Tabela 4.3, para estabelecer as relações entre os dados obtidos somente por sensores remotos e relações entre dados *in situ*.

Tabela 4.3: Data das imagens, Sensor e Data da Passagem do Satélite de Altimetria

Data das Imagens	Sensor	Data da Altimetria
13 de Outubro, 2002	Landsat 7 ETM+	16 de Outubro, 2002
06 de Março, 2003	Landsat 7 ETM+	05 de Março, 2003
06 de Julho, 2004	Landsat 5 TM	07 de julho, 2004
27 de Novembro, 2004	Landsat 5 TM	24 de Novembro, 2004
29 de Junho, 2007	Landsat 5 TM	28 de Junho, 2007
31 de Julho, 2007	Landsat 5 TM	2 de Agosto, 2007
17 de Julho, 2008	Landsat 5 TM	17 de Julho, 2008
18 de Agosto, 2008	Landsat 5 TM	21 de Agosto, 2008
4 de Julho, 2009	Landsat 5 TM	3 de Julho, 2009
21 de Junho, 2010	Landsat 5 TM	18 de Junho, 2010
24 de Agosto, 2010	Landsat 5 TM	27 de Agosto, 2010
15 de Julho, 2013	Landsat-8 OLI	13 de Julho, 2013
8 de Fevereiro, 2014	Landsat-8 OLI	7 de Fevereiro, 2014
12 de Março, 2014	Landsat-8 OLI	14 de Março, 2014
03 de Agosto, 2014	Landsat-8 OLI	01 de Agosto, 2014
04 de Setembro, 2014	Landsat-8 OLI	03 de Setembro, 2014

4.3.1 Relação entre Nível e Área

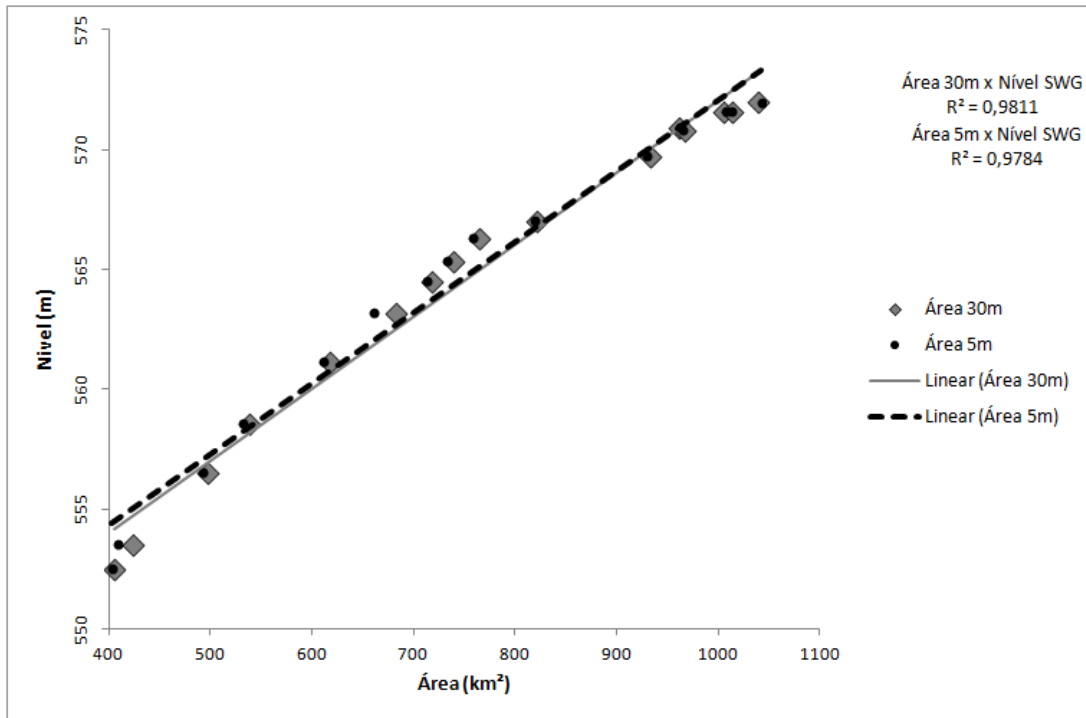
Uma vez estabelecidos todos os valores de nível de água das Estações SWG e de área do espelho d'água do reservatório (pixel de 30 m e interpolado 5 m), foram calculadas a regressão linear e não linear para as relações entre essas variáveis (Estações SWG *vs* Área (30 m) e Estações SWG *vs* Área (5 m)). Os dados foram traçados nos gráficos (Figuras 4.2 (a) e (b)) mostrando as tendências linear e não linear entre as medidas de nível e a área.

$$\text{Nível}_{SWG} = 541,9646 + 0,030(\text{Área}_{30m}) \quad (4.1)$$

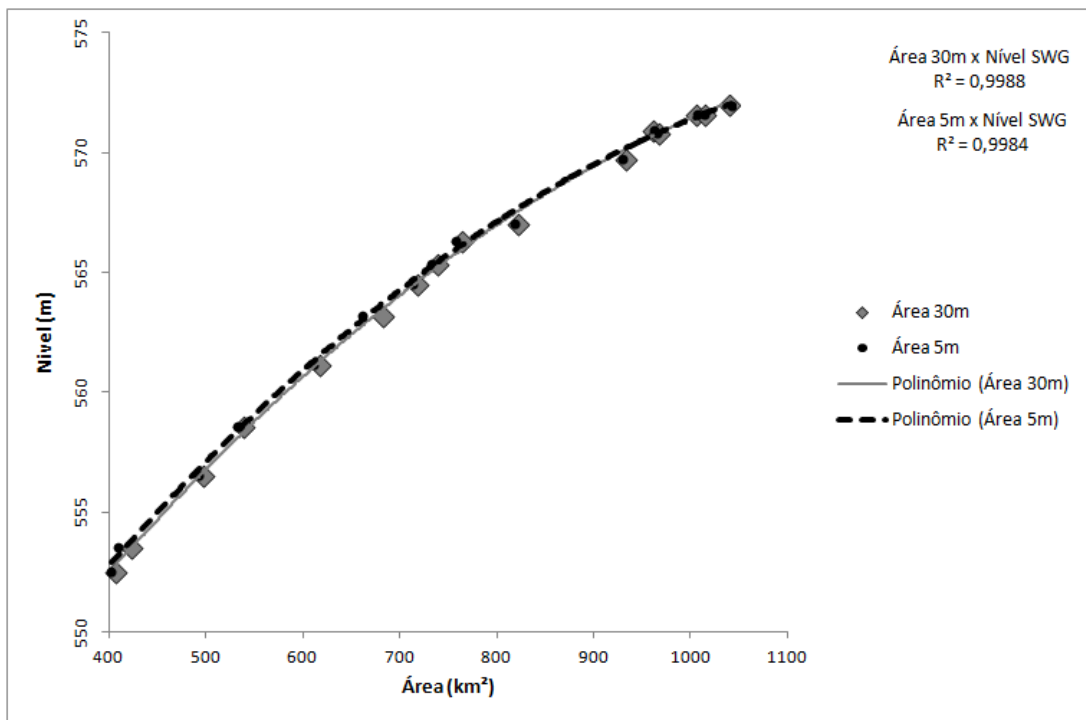
$$\text{Nível}_{SWG} = 542,496 + 0,029(\text{Área}_{5m}) \quad (4.2)$$

$$\text{Nível}_{SWG} = -0,00002(\text{Área}_{30m})^2 + 0,0642(\text{Área}_{30m}) + 530,53 \quad (4.3)$$

$$\text{Nível}_{SWG} = -0,00002(\text{Área}_{5m})^2 + 0,0647(\text{Área}_{5m}) + 530,78 \quad (4.4)$$



(a)



(b)

Figura 4.2: Relação entre Áreas e Nível de Água. a) A reta contínua cinza representa a regressão linear para os níveis SWG e áreas obtidas com as imagens de pixel de 30 m e a reta pontilhada para os níveis SWG e áreas obtidas com as imagens interpoladas para pixel de 5 m.; b) A curva contínua cinza representa a regressão não linear para os níveis SWG e áreas obtidas com as imagens de pixel de 30 m e a curva pontilhada para os níveis SWG e áreas obtidas com as imagens interpoladas para pixel de 5 m.

As equações para as duas retas de regressão linear apresentam coeficientes de regressão muito próximos e o coeficiente de constante teve uma diferença de 0,53 *m*, como mostram as Equações 4.1 e 4.2. A partir do gráfico da regressão linear foi notada uma tendência nos dados que poderia ser melhor ajustada com o uso de um polinômio de segundo grau, como mostram as Equações 4.3 e 4.4. De fato houve uma melhora no coeficiente de determinação (R^2) que passou de $R^2 = 0,9811$ para $R^2 = 0,9988$ na relação entre Área 30 *m* e Nível SWG, e de $R^2 = 0,9784$ para $R^2 = 0,9984$ na relação entre Área 5 *m* e Nível SWG.

4.3.2 Variação de Volume ($\Delta Volume_{SWG}$)

A combinação dos níveis altimétricos das Estações SWG e áreas do espelho d'água (30 e 5 *m*), foram usadas para estimar a variação de volume no reservatório entre as datas selecionadas para dados gerados por sensoriamento remoto (ver Equação 3.6).

Tabela 4.4: Variação de Volume do Reservatório em hm^3

Datas	$\Delta Volume_{30m}$	$\Delta Volume_{5m}$
13/10/2002 a 06/03/2003	224,3517457	222,6711794
06/03/2003 a 06/07/2004	608,2316614	607,7727869
06/07/2004 a 27/11/2004	-467,9243272	-467,3371453
27/11/2004 a 29/06/2007	399,0663196	398,0787943
29/06/2007 a 31/07/2007	-111,6581881	-111,6217022
31/07/2007 a 17/07/2008	180,3962351	180,2779109
17/07/2008 a 18/08/2008	-81,523412	-81,50200574
18/08/2008 a 04/07/2009	119,2211342	119,3914135
04/07/2009 a 21/06/2010	-459,2082083	-459,698681
21/06/2010 a 24/08/2010	-132,7058996	-132,1182026
24/08/2010 a 15/07/2013	-154,1445603	-151,3702932
15/07/2013 a 08/02/2014	-280,0318669	-274,2099647
08/02/2014 a 12/03/2014	-104,0328997	-103,0824657
12/03/2014 a 03/08/2014	-138,3645636	-135,597201
03/08/2014 a 04/09/2014	-43,34580074	-42,48841216

Também foi estabelecida uma regressão linear para a variação de volume usando as Equações 4.5 e 4.6, mostrando um comportamento quase idêntico no volume para ambas medidas das Áreas 30 *m* e 5 *m* (Figura 4.3(a)).

A regressão não linear feita para a relação entre as variações de volume e nível não apresentou nenhuma melhora significativa no ajuste dos dados (Equações 4.7 e 4.8), como pode ser observado no gráfico e nos valores dos coeficientes de determinação R^2 (Figuras 4.3 (a) e (b)), passando de um valor de R^2 linear de 0,973 para 0,975 nos dados para imagens com pixel de 30 *m* e de 0,972 para 0,974 nos dados para imagens com pixel de 5 *m*.

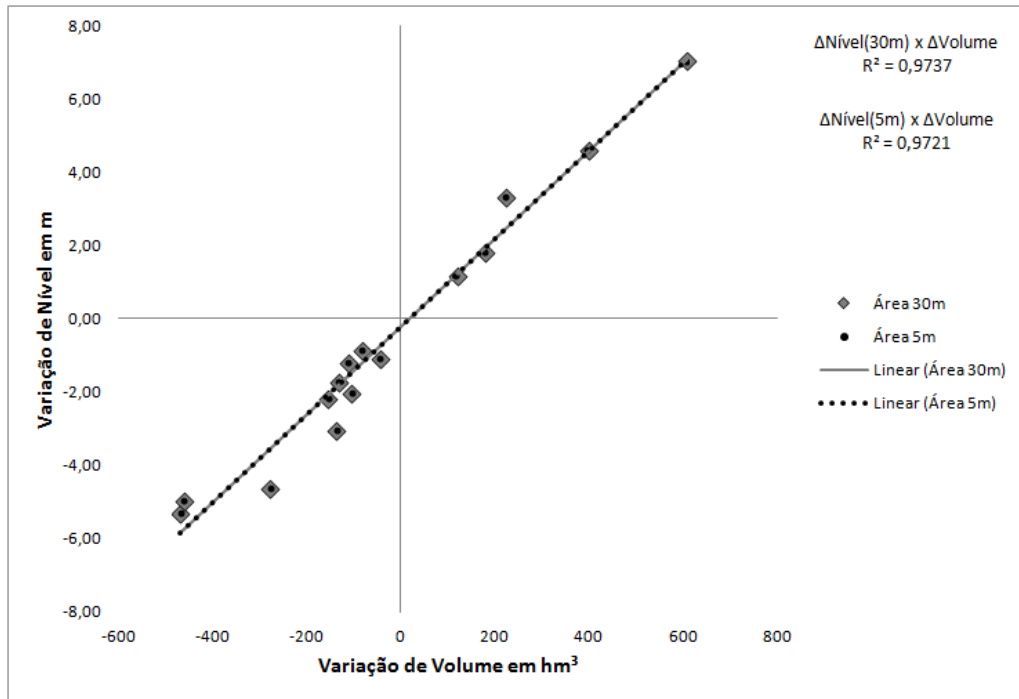
$$\Delta Nível = -0,22431 + 0,012014(\Delta Volume_{30m}) \quad (4.5)$$

$$\Delta Nível = -0,23229 + 0,012038(\Delta Volume_{5m}) \quad (4.6)$$

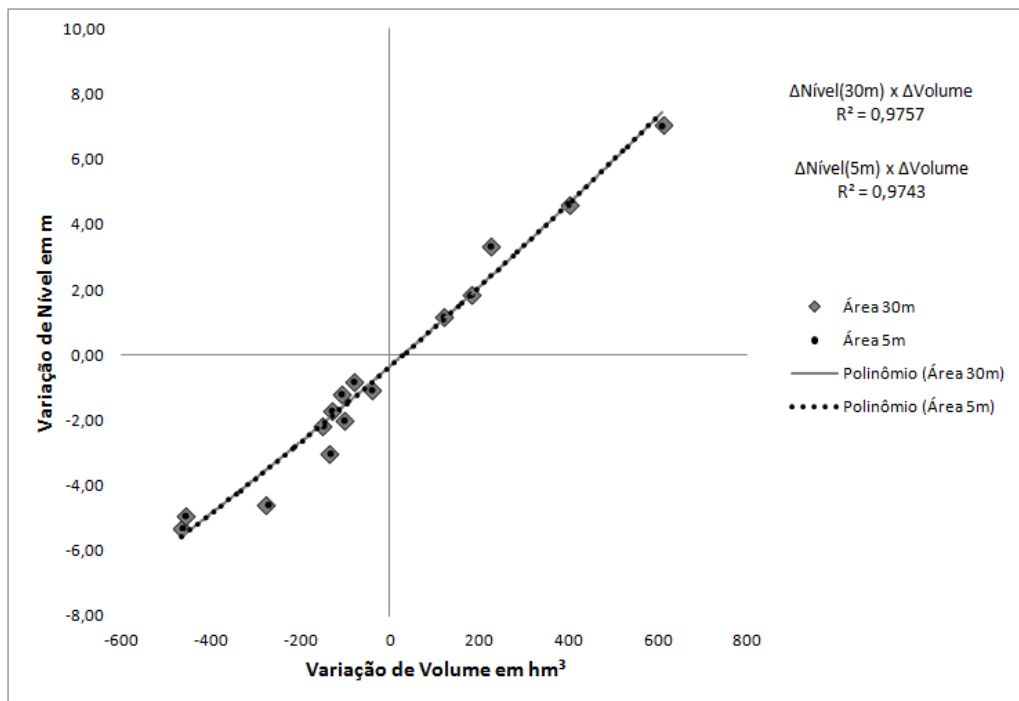
$$\Delta\text{Nível} = -0,000002(\Delta\text{Volume}_{30m})^2 + 0,0119(\Delta\text{Volume}_{30m}) - 0,3519 \quad (4.7)$$

$$\Delta\text{Nível} = -0,000002(\Delta\text{Volume}_{5m})^2 + 0,0119(\Delta\text{Volume}_{5m}) - 0,3642 \quad (4.8)$$

As variações de volume encontradas estão apresentadas na Tabela 4.4 e o valor total de entre o nível mais baixo e o mais alto foi de $1405,98 \text{ hm}^3$ e $1407,19 \text{ hm}^3$, para as Áreas de 30 m e 5 m , respectivamente. O RMSE calculado para a variação de volume encontrada a partir das áreas foi de $1,79 \text{ hm}^3$. O reservatório de Três Marias atingiu em 2014 seu menor nível desde o fechamento da barragem, esse nível pode ser observado na Figura 4.1.



(a)



(b)

Figura 4.3: Relação entre volume e variação de nível de água. a) A reta pontilhada representa a regressão linear para o volume obtido com as áreas de 5 m e a reta cinza para o volume com as áreas de 30 m.; b) A curva contínua cinza representa a regressão não linear para o volume obtido com as áreas das imagens de pixel de 30 m e a curva pontilhada para o volume com áreas obtidas com as imagens interpoladas para pixel de 5 m.

4.4 Modelo de Área e Nível

Foram usadas no total 175 datas com dados obtidos por sensoriamento remoto, sendo imagens ou nível d'água por altimetria satélite. Destas datas, 73 correspondem a imagens Landsat e 102 a medidas de Nível_{SWG}. Do total de imagens, 57 não possuem informação sobre Nível_{SWG}; já do total de medidas de Nível_{SWG}, 86 não possuem imagens Landsat correspondentes.

A partir das relações estabelecidas entre Nível_{SWG}, Área_{30m} e Área_{5m} foi definido o modelo que melhor determina valores de uma variável a partir da outra. Apesar de terem apresentando coeficientes de determinação R^2 um pouco melhores do que os apresentados pelas regressões lineares, as regressões não lineares apresentaram valores piores quando comparados aos gerados pela regressão linear e aos dados *in situ*.

O modelo de regressão linear gerado a partir das medidas de Área_{30m} e obteve resultados mais próximos aos dados *in situ* fornecidos pela CEMIG, sendo assim o escolhido para gerar a série completa de dados.

Para a obtenção dos valores de área foi usada a Equação 4.9, gerada a partir da Equação 4.1 que também foi usada para obter os valores de nível para o modelo. Já para a variação de volume para os dados gerados a partir do modelo e também para os dados *in situ*, foi usada a Equação 3.6

$$\text{Área}_{Modelo} = \frac{\text{Nível}_{SWG}}{0,030} - 541,9646 \quad (4.9)$$

A síntese dos resultados da aplicação do modelo é apresentada na Tabela D.1, na qual as datas em itálico apresentam medições de Nível geradas pelo SWGTOOL, tendo assim seus valores de área dados pelo modelo. As datas que não estão em itálico tiveram seu nível inferido a partir do modelo, usando os valores de área obtidos pelas imagens Landsat. A data de 17/07/2008* é a única que apresenta tanto dados da área de imagem Landsat quanto nível gerado pelo SWGTOOL.

A partir dos resultados foram elaborados os gráficos das Figuras 4.5, 4.4 e 4.6 mostrando a série temporal para as 175 datas com dados *in situ* da CEMIG e a série temporal dos dados gerados pelo modelo e por sensoriamento remoto.

No gráfico da Figura 4.4 percebe-se a ocorrência de desvios (*outliers*) de algumas medidas feitas a partir do modelo em duas situações: os momentos de cheia do reservatório no período de 2004 a 2008, e níveis de águas mais baixas no período de 2013 a 2015 mostrando uma tendência linear. Em ambos os casos, as medidas resultantes do modelo apresentam valores superiores às apresentadas pelas medições *in situ* da CEMIG. Já no gráfico da Figura 4.5 observa-se também desvios nos valores das áreas obtidas pelo modelo para os mesmos períodos temporais mencionados no gráfico da Figura 4.4. Diferente do primeiro gráfico, os desvios observados apresentam valores menores do que os obtidos através das medidas da CEMIG. No gráfico da Figura 4.6 os desvios mostrados para os valores de variação do volume não possuem um período temporal específico, diferente dos desvios encontrados para os outros dados gerados pelo modelo (nível e área).

Esses desvios tanto nos valores de área, nível e volume do modelo podem ser explicados

pelo fato das equações de “cota \times área” e “cota \times volume” fornecidas pela CEMIG terem sido geradas a partir da topografia primitiva das cartas da década de 1960 do Vale do São Francisco na área do reservatório, resultando em valores de área e volume que não condizem com a realidade atual do reservatório. Com mais de cinquenta anos de operação, a topografia de fundo do lago de Três Marias já não é a mesma dos primeiros anos de fechamento com a deposição de sedimentos carregados pelos afluentes reservatório ao longo dos anos. Possivelmente com a atualização dos dados referentes ao reservatório com estudos de batimetria fomentando um novo cálculo dos coeficientes das equações de “cota \times área” e “cota \times volume” os erros e desvios encontrados possam ser minimizados.

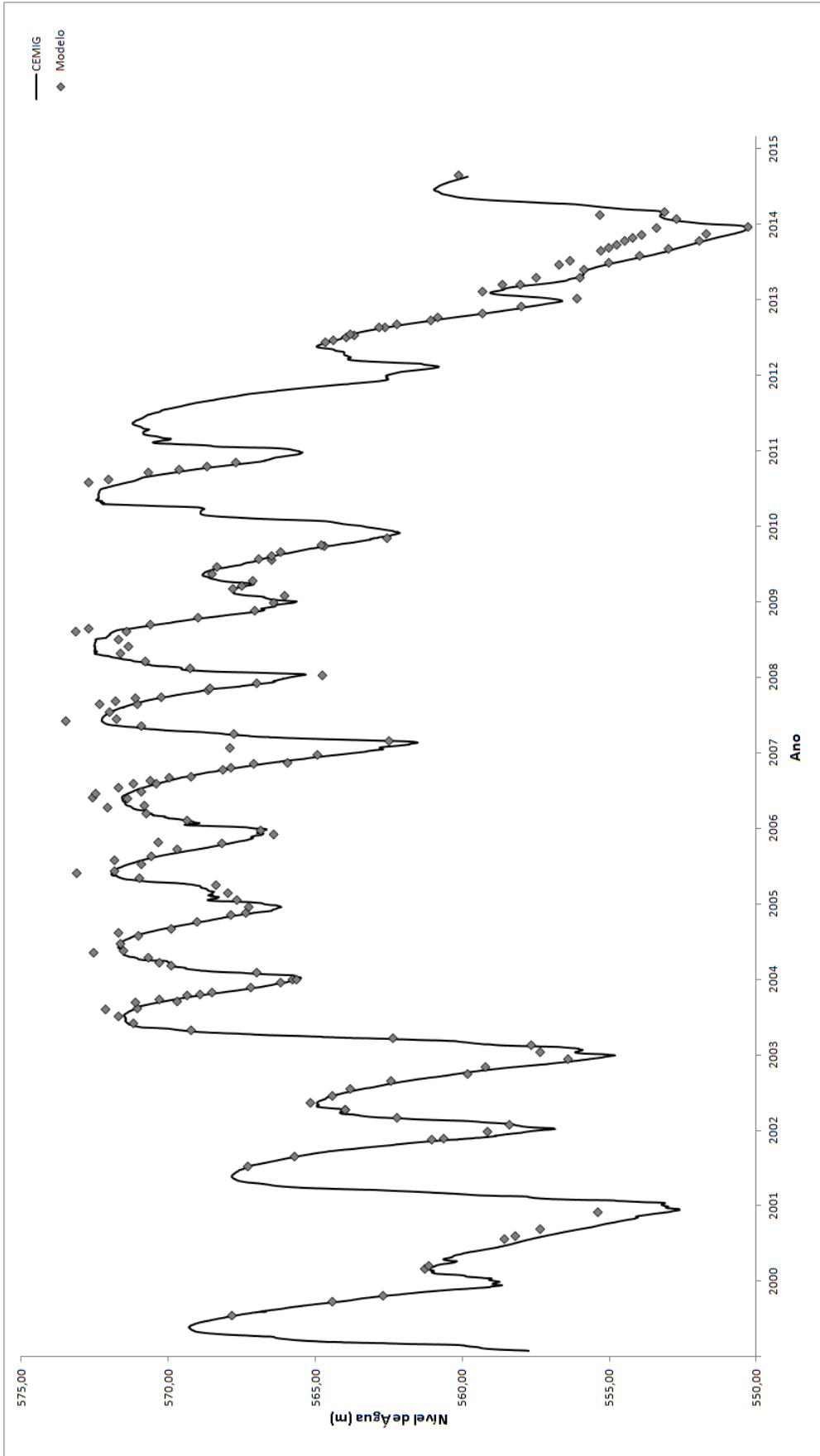


Figura 4.4: Série temporal do nível do reservatório de Três Marias entre 2000 e 2015 de acordo com dados *in situ* da CEMIG. Os losangos mostram os níveis de água calculados a partir do modelo.

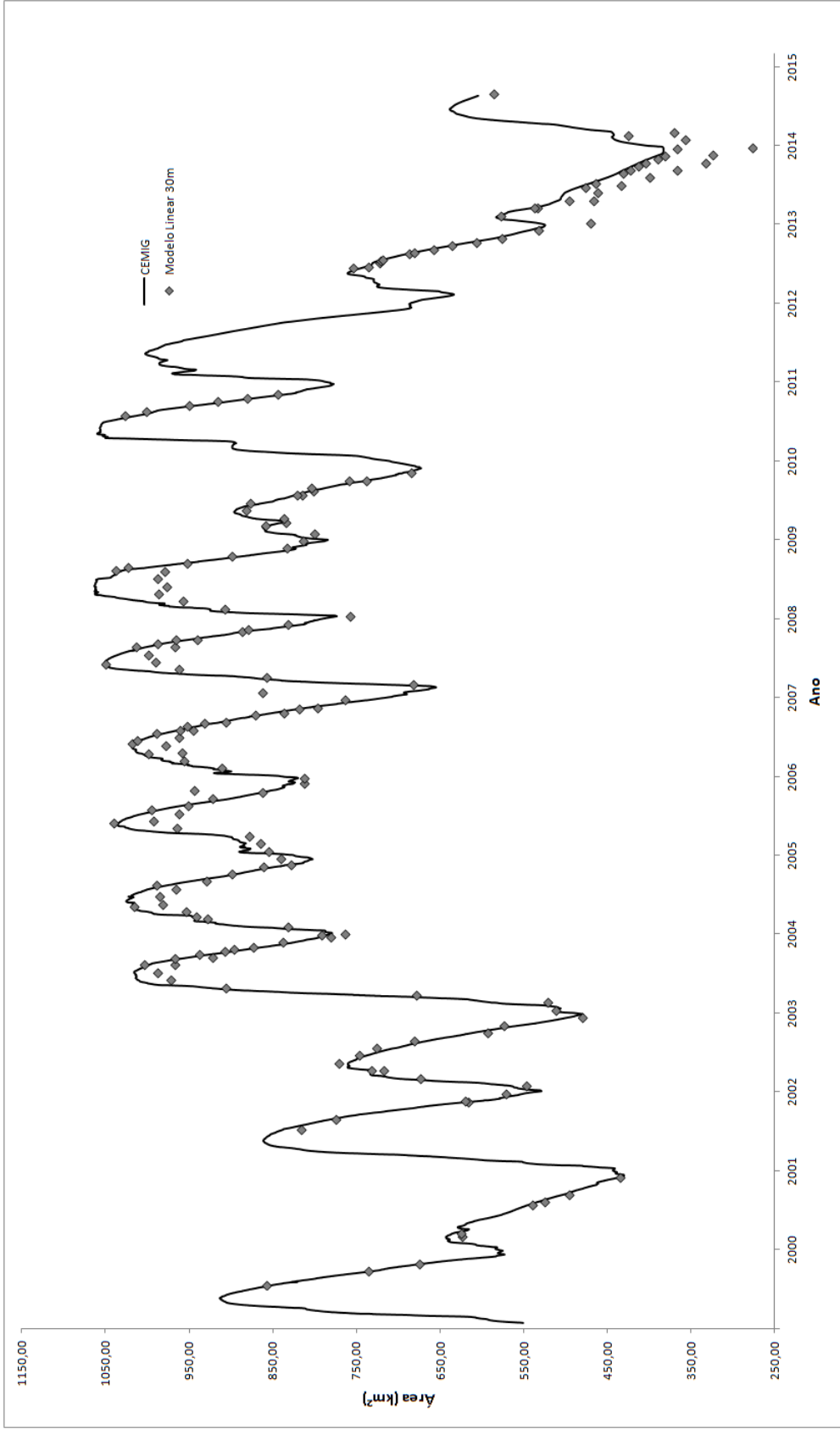


Figura 4.5: Série temporal das áreas do reservatório de Três Marias entre 2000 e 2015 de acordo com dados *in situ* da CEMIG. Os losangos mostram as áreas calculadas a partir do modelo.

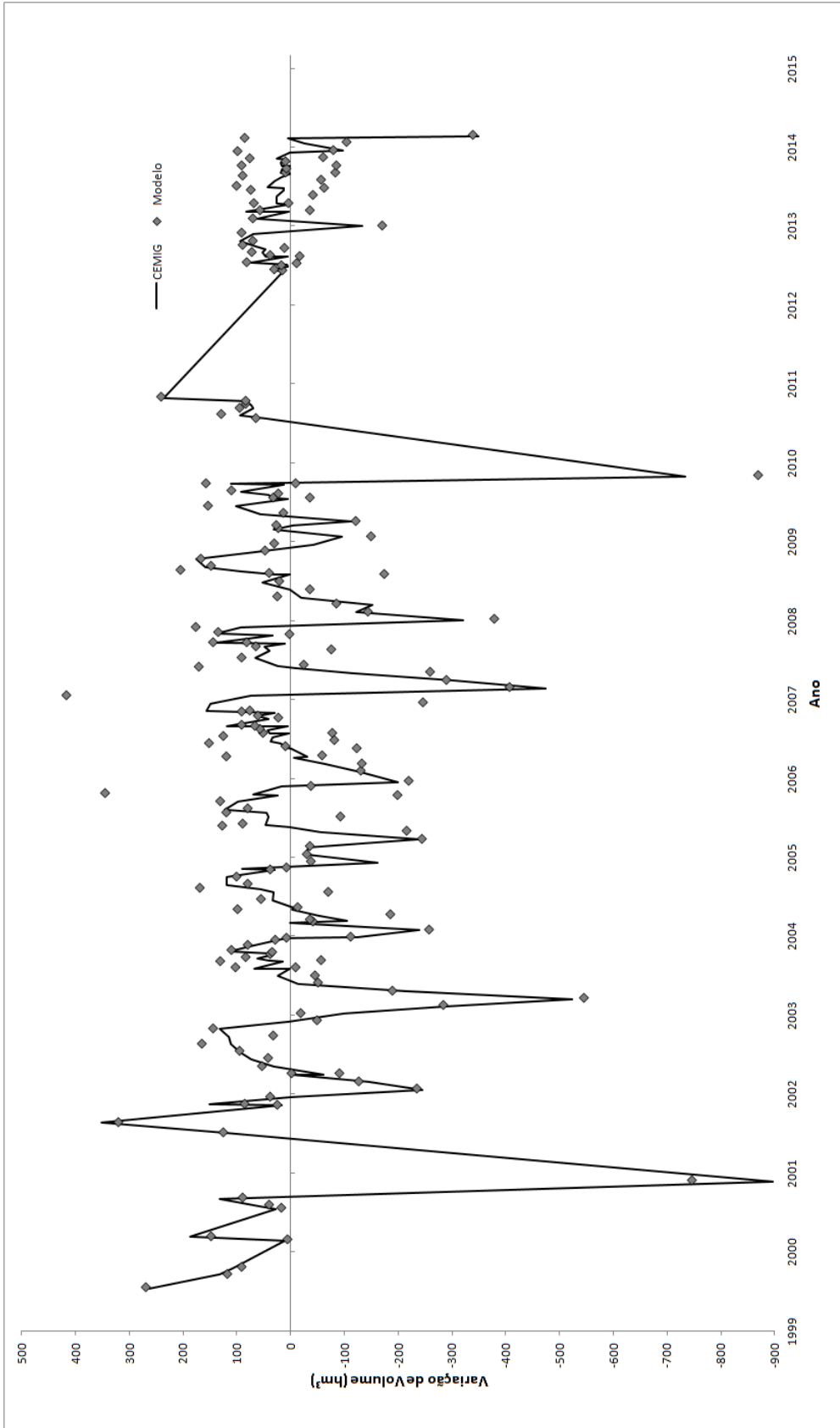


Figura 4.6: Série temporal da variação do volume do reservatório de Três Marias para as 175 datas entre 2000 e 2015 de acordo com dados *in situ* da CEMIG. Os losangos mostram os valores de variação de volume gerados a partir do modelo, para as mesmas datas.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal dessa dissertação foi apresentar um método de uso combinado da altimetria obtida por satélite, das missões Envisat e SARAL, com imagens Landsat da superfície do lago do Reservatório de Três Marias para modelar variações volumétricas e avaliar a precisão do método em relação aos dados obtidos *in situ*.

A metodologia foi aplicada no reservatório de Três Marias que é um dos mais antigos do Brasil e considerado de extrema importância na regulação do fluxo do Rio São Francisco para as regiões Média, Sub-Média e Baixa de sua bacia. Em um primeiro momento, foram levantados os dados de monitoramento *in situ* feito pela CEMIG com intervalo temporal de quase quinze anos (desde 2000 até Julho de 2015) e as curvas de “Área \times Cota” e “Volume \times Cota” geradas para o reservatório. Esses dados *in situ* permitiram a comparação e validação dos dados gerados através de sensoriamento remoto.

Os dados de altimetria por satélite gerados pelo Envisat para os anos de 2002 a 2010, e pelo SARAL de 2013 a 2015, foram baixados e processados para obter o valor final de nível de água do reservatório. As imagens Landsat de três sensores diferentes (TM, ETM+ e OLI) foram selecionadas para a criação de uma série temporal das áreas do espelho d’água do reservatório.

A partir dos resultados da aplicação da metodologia, foram estabelecidas relações entre as variáveis de nível, área e variação de volume. A partir das regressões feitas dos dados gerados por sensoriamento remoto e sua comparação com os dados *in situ* da CEMIG foi possível estabelecer um modelo no qual pode-se inferir o valor do nível da água a partir do valor da área do espelho d’água obtido através da classificação de uma imagem Landsat ou então inferir a área do espelho d’água a partir do valor de nível obtido por altimetria. A diferença média absoluta entre as medidas de área por sensoriamento remoto e as obtidas a partir da curva “cota \times área” da CEMIG é de $9,9 \text{ km}^2$. Já o RMSE para as medidas de nível por altimetria foi de $0,7 \text{ m}$ em relação às medidas *in situ* da estação no barramento da represa. O modelo final gerado com dados de sensoriamento remoto apresentou um $R^2 = 0,98$ em relação aos dados *in situ* da CEMIG.

Os resultados gerados podem ser usados para o monitoramento sazonal do reservatório de Três Marias auxiliando na compreensão dos diferentes processos que compõem o balanço hidrológico do lago. Através do aprofundamento nos estudos e técnicas de processamento de

dados tende-se à obtenção de medidas de nível com maior acurácia, com o desenvolvimento de novas correções e até mesmo novos retrackers de altimetria.

Este trabalho mostra a viabilidade de se estimar variações de volume de lagos e reservatórios usando somente dados de satélites disponíveis online e gratuitamente. A metodologia desenvolvida para o reservatório de Três Marias pode ser aplicada em outros lagos e reservatórios dependendo somente da sua disponibilidade geográfica, uma vez que a altimetria por satélite não está limitada somente aos sensores Envisat e SARAL. Com os resultados obtidos, o trabalho vem somar a outros já citados ressaltando o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento de variações volumétricas em lagos e reservatórios contribuindo também para o livre acesso à informações sobre recursos hídricos.

O uso de dados de altimetria por satélite com referência global permite que comparações com outros lagos e reservatórios em outras partes do mundo seja feita de maneira mais fácil e também que uma base de dados possa ser criada e alimentada com estas informações para pesquisas futuras, dando acesso a dados de nível de água para o público geral. Outra vantagem da cobertura global dos dados de altimetria é a possibilidade de realizar medidas em áreas de difícil acesso, permitindo que locais pouco estudados ou com baixa densidade de estações *in situ* possa ter uma rede virtual complementar de informações.

Apesar do foco inicial da altimetria por satélite não ter sido a hidrologia, a grande quantidade de dados gerados contribui para o avanço dos estudos nesta área (Calmant e Seyler, 2006). Os dados produzidos podem ser utilizados de modo complementar aos dados *in situ*, para a criação de séries temporais (como as geradas nesse estudo), perfis altimétricos e, também, para o nivelamento de estações de monitoramento.

Devido a grande quantidade de missões presentes e futuras, a evolução dos sensores radar e suas potencialidades de aplicação, a altimetria por satélite tende a tornar-se cada vez mais proveitosa para os estudos em hidrologia. O lançamento de novas missões levando a bordo tecnologias com melhor resolução espacial tende a melhorar a acurácia dos dados e com isso é esperado que mais estudos sejam realizados fomentando a criação de bases de dados mais robustas que ajudem a melhorar o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos, também em áreas remotas. Dessa forma, a altimetria por satélite torna-se um recurso cada vez mais mais operacional no monitoramento hidrológico não só de lagos e reservatórios, mas de hidrologia continental como um todo.

Referências Bibliográficas

- Abreu, L. G. Á. d. C. e P. Maillard (2014). A model based on satellite altimetry and imagery to evaluate water volume changes in a reservoir in brazil. In *SPIE Remote Sensing*, pp. 92391B–92391B. International Society for Optics and Photonics.
- ANA (2009). *Inventário das Estações Fluviométricas* (2 ed.), pp. 196. Agência Nacional de Águas - SGH.
- ANA (2014). Agência Nacional de Águas. URL: <http://www.ana.gov.br>.
- ANA e ANEEL (2010). Agência nacional de Águas e agência nacional de energia elétrica. resolução conjunta nº3, de 10 de agosto de 2010. Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências. URL: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2010003cj.pdf>.
- ANEEL (2012). Agência nacional de energia elétrica. resolução normativa nº501, de 24 de julho de 2012. Estabelece os procedimentos para o mapeamento dos bens imóveis e das áreas vinculados à concessão de usinas hidrelétricas. URL: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012501.pdf>.
- Arsen, A., J.-F. Crétaux, e R. A. del Rio (2015). Use of saral/altika over mountainous lakes, intercomparison with envisat mission. *Marine Geodesy* 38(sup1), 534–548.
- Baker, S., O. Bombaci, C. Zeli, P. Venditti, O. Zanife, B. Soussi, J. Dumont, J. Stum, M. Milagro-Perez, e J. Benveniste (2002). *ENVISAT RA2 / MWR Product Handbook*. 204, p.
- Barker, J. L. (1975). Monitoring water quality from landsat. *NASA Technical Memorandum TM X71006*.
- Birkett, C. (1994). Radar altimetry: a new concept in monitoring lake level changes. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 75(24), 273–275.
- Birkett, C. (1995). The global remote sensing of lakes, wetlands and rivers for hydrological and climate research. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995*.

- IGARSS'95. 'Quantitative Remote Sensing for Science and Applications', International, Volume 3, pp. 1979–1981. IEEE.
- BlackBridge AG (2015). High-resolution satellite imagery. Brochure.
- Brito, S. (2010). *Caracterização limnológica e produtividade secundária das principais espécies de microcrustáceos em dois braços dos reservatórios de Três Marias e Furnas, Minas Gerais, Brasil*. 107, p.
- Bronner, E., A. Guillot, N. Picot, e J. Noubel (2013). *SARAL/AltiKa Products Handbook*. 86, p.
- Cachapuz, P. B. d. B. (2006). *Usinas da CEMIG 1952-2005*. 304, p.
- Calmant, S. e F. Seyler (2006). Continental surface waters from satellite altimetry. *C.R. Geoscience* 338, 1113–1122.
- Calmant, S., F. Seyler, e J. F. Cretaux (2008). Monitoring continental surface waters by satellite altimetry. *Surveys in Geophysics* 29(4), 247–269.
- CEMIG (2014). Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, URL: http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Usinas_Hidreletricas.aspx.
- Créaux, J.-F. e C. Birkett (2006). Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geoscience* 338(14), 1098–1112.
- Créaux, J.-F., S. Calmant, V. Romanovski, A. Shabunin, F. Lyard, M. Bergé-Nguyen, A. Cazenave, F. Hernandez, e F. Perosanz (2009). An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issykkul in Central Asia. *Journal of Geodesy* 83(8), 723–735.
- Da Silva, J., S. Calmant, F. Seyler, O. Rotunno Filho, G. Cochonneau, e W. Mansur (2010). Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment* 114, 2160–2181.
- Da Silva, J. S., F. Seyler, S. Calmant, O. C. Rotunno Filho, E. Roux, A. A. M. Araújo, e J. L. Guyot (2012). Water level dynamics of Amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry. *International Journal of Remote Sensing* 33(11), 3323–3353.
- Desai, S. D. (2002). Observing the pole tide with satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 107(C11), 13.
- Diekmann, F. J., D. Mesples, P. G. Bargellini, M. Nilsson, L. Ventimiglia, M. Canela, S. Vazana, e T. Fehr (2010). Extending the Envisat Mission—Impacts on Ground and Space Segment Operations. In *SpaceOps 2010 Conference Delivering on the Dream Hosted by NASA Marshall Space Flight Center and Organized by AIAA*.

- Duan, Q. (2003). Global optimization for watershed model calibration. *Water Science and Application* 6, 89–104.
- Duan, Z. e W. Bastiaanssen (2013). Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment* 134, 403–416.
- ESA (2014). European Space Agency. URL: <http://www.esa.int>.
- Espindola, G. M. d. e G. Câmara (2007). Ajuste de parâmetros no algoritmo de segmentação de imagens do software ecognition®. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto XIII*, 5739–5744.
- Freden, S. C. e F. Gordon Jr. (1983). *Manual of Remote Sensing* (2 ed.), Volume 1. Falls Church, Virginia: 517-570, p.
- Fu, LL and Alsdorf, D and Morrow, R and Rodriguez, E and Mognard, N (2012). *SWOT: The Surface Water and Ocean Topography Mission: Wide-Swath Altimetric Measurement of Water Elevation on Earth*. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena California, pages =.
- Gao, H., C. Birkett, e D. P. Lettenmaier (2012). Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resources Research* 48(9).
- Gardini, B., G. Graf, e G. Ratier (1995). The instruments on ENVISAT. *Acta Astronautica* 37, 301–311.
- Gupta, R. e S. Banerji (1985). Monitoring of reservoir volume using landsat data. *Journal of hydrology* 77(1-4), 159–170.
- Harris, A. e I. Mason (1989). Lake area measurement using avhrr a case study. *International Journal of Remote Sensing* 10(4-5), 885–895.
- Harris, A., I. Mason, C. Birkett, e J. Mansley (1992). Lake remote sensing for global climate research. *ESA, Environment Observation and Climate Modelling Through International Space Projects. 1*.
- IOGP (2012). Publication 373-7-1 geomatics guidance note.
- Irons, J. R., J. L. Dwyer, e J. A. Barsi (2012). The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. *Remote Sensing of Environment* 122, 11–21.
- Jain, S. K., R. D. Singh, M. K. Jain, e A. K. Lohani (2005). Delineation of flood-prone areas using remote sensing technique. *Water Resources Management* 19(4), 337–347.
- Jantunen, H. e J. Raitala (1984). Locating shoreline changes in the porttipahta (finland) water reservoir by using multitemporal landsat data. *Photogrammetria* 39(1), 1–12.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall, New Jersey. 526 p.

- Jensen, J. R., J. C. N. Epiphanyo, A. R. Formaggio, A. R. dos Santos, B. F. T. Rudorff, C. M. de Almeida, e L. S. Galvão (2009). *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. Parêntese Editora São José dos Campos.
- Ji, L., L. Zhang, e B. Wylie (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 75(11), 1307–1317.
- Kaula, W. *et al.* (1970). The terrestrial environment: solid earth and ocean physics. *NASA Contract. Rep 1599*, 158pp.
- Knight, E. J. e G. Kvaran (2014). Landsat-8 operational land imager design, characterization and performance. *Remote Sensing* 6(11), 10286–10305.
- Lauer, D. T., S. A. Morain, e V. V. Salomonson (1997). The Landsat program: Its origins, evolution, and impacts. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63(7), 831–838.
- Lillesand, T. M. e R. W. Kiefer (2007). *Remote Sensing and Image Interpretation* (6th ed.). John Wiley and Sons.
- Loveland, T. R. e J. L. Dwyer (2012). Landsat: Building a strong future. *Remote Sensing of Environment* 122, 22–29.
- Luz, R. T. (2002). Acompanhamento do Datum Altimétrico IMBITUBA através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro. In *VII Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra*, Santiago, Chili, pp. 1–8. Instituto Geografico Militar de Chile.
- Maillard, P., N. Bercher, e S. Calmant (2015). New processing approaches on the retrieval of water levels in envisat and saral radar altimetry over rivers: A case study of the são francisco river, brazil. *Remote Sensing of Environment* 156, 226–241.
- Maillard, P. e S. Calmant (2013). Spatial processing techniques for satellite altimetry applications in continental hydrology. In *Proceedings of SPIE Remote Sensing 2013*, Volume 8887, Dresden, Germany, pp. 1–14. International Society for Optics and Photonics.
- Maillard, P., M. Pivari, e C. Pires-Luiz (2012). *Remote sensing for mapping and monitoring wetlands and small lakes in Southeast Brazil*, pp. 21–44. Rijeka, Croatia: InTech - Open Access Publisher.
- Ministério do Meio Ambiente (2006). *Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco*. 148, p.
- Misev, D., M. Rusu, e P. Baumann (2012). A semantic resolver for coordinate reference systems. In *Web and Wireless Geographical Information Systems*, pp. 47–56. Springer.
- Morfitt, R., J. Barsi, R. Levy, B. Markham, E. Micijevic, L. Ong, P. Scaramuzza, e K. Vanderwerff (2015). Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) radiometric performance on-orbit. *Remote Sensing* 7(2), 2208–2237.

- NASA (2015). Landsat Science. URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
- Nurlidiasari, M. (2004). The Application of QuickBird and Multi-temporal Landsat TM Data for Coral Reef Habitat Mapping Case Study: Derawan Island, East Kalimantan, Indonesia. Master's thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
- Pietsch, B. M. (2015). *Dispensational Modernism*. Oxford University Press.
- QGIS Development Team (2015). Qgis geographic information system.
- Resti, A., J. Benveniste, M. Roca, G. Levrini, e J. Johannessen (1999). The Envisat radar altimeter system (RA-2). *ESA bulletin* 98(8), 58–60.
- Reuter, D. C., C. M. Richardson, F. A. Pellerano, J. R. Irons, R. G. Allen, M. Anderson, M. D. Jhabvala, A. W. Lunsford, M. Montanaro, R. L. Smith, *et al.* (2015). The Thermal Infrared Sensor (TIRS) on Landsat 8: Design overview and pre-launch characterization. *Remote Sensing* 7(1), 1135–1153.
- Richard, J., B. Durand, F. Robert, N. Taveneau, N. Stenou, e P. Sengenés (2008). AltiKa Instrument for Space Altimetry with Improved Performances and Ocean Sampling: Development Status and First Test Results. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, Volume 3, pp. III–67. IEEE.
- Richter, R. e D. Schläpfer (2014). *ATCOR-2/3 User Guide (ver. 8.3.1)*. ReSe Applications Schläpfer.
- Ričko, M., C. M. Birkett, J. A. Carton, e J.-F. Crétaux (2012). Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry. *Journal of Applied Remote Sensing* 6(1), 061710–061710.
- Robertson, D. M., W. J. Rose, e H. S. Garn (2003). *Water quality and the effects of changes in phosphorus loading, Red Cedar Lakes, Barron and Washburn Counties, Wisconsin*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Sandau, R. (2010). Status and trends of small satellite missions for Earth observation. *Acta Astronautica* 66(1), 1–12.
- Scherz, J. P., D. R. Crane, e R. H. Rogers (1975). Classifying and monitoring water quality by use of satellite imagery. In *International Conference on Environmental Sensing and Assessment*.
- Shiklomanov, I. A. (1998). *World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Silva, G. e. a. (2012). Procedimentos para correção geométrica de imagens de satélite. *Circular Técnica Embrapa* 18, 1–18.

- Soares, J. V. (2010). Trajetória de Acumulação de Capacidades Tecnológicas: o caso da Coordenação Geral de Observação da Terra do INPE (1970-2010). Monografia de Especialização. 56p.
- Steven, W. (2012). A graceful retirement for Envisat after 10 years watching over our planet— News— BIS.
- Sulistioadi, Y. B. (2013). *Satellite Altimetry and Hydrologic Modeling of Poorly-gauged Tropical Watershed*. Ph. D. thesis, The Ohio State University.
- Trimble, D. (2010). eCognition® Developer 8.64. 0 Reference Book.
- Tucci, C. (2001). *Escoamento superficial* (2 ed.), pp. 391–441. Porto Alegre: ABRH.
- Tyc, G., J. Tulip, D. Schulten, M. Krischke, e M. Oxfort (2005). The RapidEye mission design. *Acta Astronautica* 56(1), 213–219.
- USGS (2012). Mission Accomplished for Landsat 5. (Dez/2012) URL: <http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3485#.UNShOm.7J8E>.
- USGS (2013). Technical Announcement: USGS Completes Decommissioning of Landsat 5. (Jun/ 2013) URL: <http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3626> .
- USGS, G. L. C. F. (2003). Global Land Cover Facility. URL: <http://glcf.umd.edu/data/>.
- Ustin, S. (2004). *Manual of remote sensing: Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring* (3rd ed.), Volume 4. New York, NY: 736p, p.
- Vignudelli, S., A. G. Kostianoy, P. Cipollini, e J. Benveniste (2011). *Coastal Altimetry*. Springer.
- Vincent, P., J. Verron, P. Bahurel, P. Le Traon, L. Eymard, F. Remy, J. Cretaux, J. Tournaire, e B. Chapron (2000). The Altika altimetry mission: science objectives and system definition. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, Volume 7, pp. 3036–3038. IEEE.
- Williams, D. L., S. Goward, e T. Arvidson (2006). Landsat. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(10), 1171–1178.
- Winter, T. (1995). *Hydrological processes and the water budget of lakes*, pp. 37–62. Springer.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27(14), 3025–3033.

APÊNDICES

Apêndice A

Tabela de Datas e Dados de Sensoriamento Remoto Disponíveis

Tabela A.1: Dados disponíveis para cada uma das 175 datas usadas no trabalho.

Data	Sensor Imageador	Satélite Altimétrico	Tipo de Dado Disponível
17/06/2000	L7ETM+		Área
20/08/2000	L7ETM+		Área
21/09/2000	L7ETM+		Área
27/01/2001	L7ETM+		Área
12/02/2001	L7ETM+		Área
20/06/2001	L7ETM+		Área
06/07/2001	L7ETM+		Área
07/08/2001	L7ETM+		Área
26/10/2001	L7ETM+		Área
07/06/2002	L7ETM+		Área
25/07/2002	L7ETM+		Área
13/10/2002	L7ETM+		Ambos
16/10/2002		Envisat	
20/11/2002		Envisat	Nível
25/12/2002		Envisat	Nível
29/01/2003		Envisat	Nível
05/03/2003		Envisat	Ambos
06/03/2003	L7ETM+		
09/04/2003		Envisat	Nível
14/05/2003		Envisat	Nível
18/06/2003		Envisat	Nível

Continua na próx. página

Tabela A.1 – continuação da página anterior

Data	Sensor Imageador	Satélite Altimétrico	Tipo de Dado Disponível
23/07/2003		Envisat	Nível
27/08/2003		Envisat	Nível
01/10/2003		Envisat	Nível
05/11/2003		Envisat	Nível
10/12/2003		Envisat	Nível
14/01/2004		Envisat	Nível
18/02/2004		Envisat	Nível
24/03/2004		Envisat	Nível
28/04/2004		Envisat	Nível
02/06/2004		Envisat	Nível
06/07/2004	L5TM		Ambos
07/07/2004		Envisat	
07/08/2004	L5TM		Área
11/08/2004		Envisat	Nível
23/08/2004	L5TM		Área
08/09/2004	L5TM		Área
15/09/2004		Envisat	Nível
24/09/2004	L5TM		Área
20/10/2004		Envisat	Nível
11/11/2004	L5TM		Área
24/11/2004		Envisat	Ambos
27/11/2004	L5TM		
31/12/2004		Envisat	Nível
03/02/2005		Envisat	Nível
15/02/2005	L5TM		Área
10/03/2005		Envisat	Nível
04/04/2005	L5TM		Área
14/04/2005		Envisat	Nível
19/05/2005		Envisat	Nível
23/06/2005		Envisat	Nível
09/07/2005	L5TM		Área
28/07/2005		Envisat	Nível
01/09/2005		Envisat	Nível
06/10/2005		Envisat	Nível
13/10/2005	L5TM		Área
10/11/2005		Envisat	Nível

Continua na próx. página

Tabela A.1 – continuação da página anterior

Data	Sensor Imageador	Satélite Altimétrico	Tipo de Dado Disponível
15/12/2005		Envisat	Nível
19/01/2006		Envisat	Nível
23/02/2006		Envisat	Nível
30/03/2006		Envisat	Nível
23/04/2006	L5TM		Área
04/05/2006		Envisat	Nível
08/06/2006		Envisat	Nível
26/06/2006	L5TM		Área
13/07/2006		Envisat	Nível
17/08/2006		Envisat	Nível
14/09/2006	L5TM		Área
21/09/2006		Envisat	Nível
26/10/2006		Envisat	Nível
17/11/2006	L5TM		Área
04/01/2007		Envisat	Nível
08/02/2007		Envisat	Nível
09/03/2007	L5TM		Área
15/03/2007		Envisat	Nível
19/04/2007		Envisat	Nível
26/04/2007	L5TM		Área
12/05/2007	L5TM		Área
24/05/2007		Envisat	Nível
13/06/2007	L5TM		Área
28/06/2007		Envisat	Ambos
29/06/2007	L5TM		Ambos
15/07/2007	L5TM		Área
31/07/2007	L5TM		Ambos
02/08/2007		Envisat	Ambos
06/09/2007		Envisat	Nível
17/09/2007	L5TM		Área
03/10/2007	L5TM		Área
11/10/2007		Envisat	Nível
15/11/2007		Envisat	Nível
20/12/2007		Envisat	Nível
24/01/2008		Envisat	Nível
28/02/2008		Envisat	Nível

Continua na próx. página

Tabela A.1 – continuação da página anterior

Data	Sensor Imageador	Satélite Altimétrico	Tipo de Dado Disponível
03/04/2008		Envisat	Nível
28/04/2008	L5TM		Área
08/05/2008		Envisat	Nível
12/06/2008		Envisat	Nível
17/07/2008	L5TM	Envisat	Ambos
02/08/2008	L5TM		Área
18/08/2008	L5TM		Ambos
21/08/2008		Envisat	
25/09/2008		Envisat	Nível
05/10/2008	L5TM		Área
30/10/2008		Envisat	Nível
04/12/2008		Envisat	Nível
09/01/2009		Envisat	Nível
13/02/2009		Envisat	Nível
20/03/2009		Envisat	Nível
24/04/2009		Envisat	Nível
29/05/2009		Envisat	Nível
03/07/2009		Envisat	Ambos
04/07/2009	L5TM		
20/07/2009	L5TM		Área
07/08/2009		Envisat	Nível
11/09/2009		Envisat	Nível
16/10/2009		Envisat	Nível
20/11/2009		Envisat	Nível
25/12/2009		Envisat	Nível
29/01/2010		Envisat	Nível
13/02/2010	L5TM		Área
05/03/2010		Envisat	Nível
09/04/2010		Envisat	Nível
14/05/2010		Envisat	Nível
18/06/2010		Envisat	Ambos
21/06/2010	L5TM		
07/07/2010	L5TM		Área
23/07/2010		Envisat	Nível
24/08/2010	L5TM		Ambos
27/08/2010		Envisat	

Continua na próx. página

Tabela A.1 – continuação da página anterior

Data	Sensor Imageador	Satélite Altimétrico	Tipo de Dado Disponível
01/10/2010		Envisat	Nível
24/06/2011	L5TM		Área
10/07/2011	L5TM		Área
11/08/2011	L5TM		Área
27/08/2011	L5TM		Área
12/09/2011	L5TM		Área
28/09/2011	L5TM		Área
04/05/2013		Saral	Nível
12/05/2013	L8OLI		Área
28/05/2013	L8OLI		Área
08/06/2013		Saral	Nível
13/06/2013	L8OLI		Área
13/07/2013		Saral	Ambos
15/07/2013	L8OLI		Ambos
31/07/2013	L8OLI		Área
17/08/2013		Saral	Nível
01/09/2013	L8OLI		Área
21/09/2013		Saral	Nível
26/10/2013		Saral	Nível
30/11/2013		Saral	Nível
03/01/2014		Saral	Nível
07/02/2014		Saral	Ambos
08/02/2014	L8OLI		Ambos
12/03/2014	L8OLI		Ambos
14/03/2014		Saral	Ambos
18/04/2014		Saral	Nível
15/05/2014	L8OLI		Área
23/05/2014		Saral	Nível
31/05/2014	L8OLI		Área
27/06/2014		Saral	Nível
18/07/2014	L8OLI		Área
01/08/2014		Saral	Ambos
03/08/2014	L8OLI		Ambos
19/08/2014	L8OLI		Área
04/09/2014	L8OLI		Ambos
05/09/2014		Saral	Ambos

Continua na próx. página

Tabela A.1 – continuação da página anterior

Data	Sensor Imageador	Satélite Altimétrico	Tipo de Dado Disponível
20/09/2014	L8OLI		Área
06/10/2014	L8OLI		Área
10/10/2014		Saral	Nível
07/11/2014	L8OLI		Área
14/11/2014		Saral	Nível
19/12/2014		Saral	Nível
10/01/2015	L8OLI		Área
23/01/2015		Saral	Nível
21/07/2015	L8OLI		Área

Apêndice B

Tabela de Resultados das Áreas

Tabela B.1: Resultados das 73 Áreas obtidas através das imagens Landsat e diferença entre a Área fornecida pela CEMIG, em km^2

Data	Sensor	Área (30 m)	Área (5 m)	Área CEMIG	Área CEMIG - (30 m)	Área CEMIG - (5 m)
17/06/2000	L7ETM+	857,2068	854,5189	859,9300	2,7232	5,4111
20/08/2000	L7ETM+	736,5609	731,4887	746,6000	10,0391	15,1113
21/09/2000	L7ETM+	674,6418	669,1628	690,0800	15,4382	20,9172
27/01/2001	L7ETM+	624,3192	619,5036	638,2500	13,9308	18,7464
12/02/2001	L7ETM+	625,2147	620,4301	637,6600	12,4453	17,2299
20/06/2001	L7ETM+	539,6175	536,0074	552,1000	12,4825	16,0926
06/07/2001	L7ETM+	525,3003	521,2970	522,0800	-3,2203	0,7831
07/08/2001	L7ETM+	496,0638	492,5944	512,3600	16,2962	19,7656
26/10/2001	L7ETM+	435,4803	431,8464	447,3300	11,8497	15,4836
07/06/2002	L7ETM+	815,7519	808,7251	842,4800	26,7281	33,7548
25/07/2002	L7ETM+	774,5877	770,3807	789,2300	14,6423	18,8493
13/10/2002	L7ETM+	616,3236	610,7502	635,0000	18,6764	24,2498
06/03/2003	L7ETM+	717,2784	712,8621	732,1100	14,8316	19,2478
06/07/2004	L5TM	1004,1633	1007,2808	1002,7500	-1,4133	-4,5308
07/08/2004	L5TM	966,9195	965,6254	969,7500	2,8305	4,1246
23/08/2004	L5TM	938,1816	935,2055	942,3900	4,2084	7,1845
08/09/2004	L5TM	907,1064	902,6447	911,3700	4,2636	8,7253
24/09/2004	L5TM	874,0710	869,0664	882,6700	8,5990	13,6035
11/11/2004	L5TM	781,2918	775,3828	804,8700	23,5782	29,4872
27/11/2004	L5TM	763,7958	758,4597	787,1500	23,3542	28,6903
15/02/2005	L5TM	941,8977	941,6467	942,3900	0,4923	0,7433
04/04/2005	L5TM	1016,5554	1019,0346	1016,2500	-0,3054	-2,7846
09/07/2005	L5TM	989,5293	990,6456	988,8000	-0,7293	-1,8456

Continua na próx. página

Tabela B.1 – continuação da página anterior

Data	Sensor	Área (30 m)	Área (5 m)	Área CEMIG	Área CEMIG - (30 m)	Área CEMIG - (5 m)
13/10/2005	L5TM	828,4041	823,1882	844,9200	16,5159	21,7318
23/04/2006	L5TM	1039,7997	1043,5840	1035,3600	-4,4397	-8,2240
26/06/2006	L5TM	995,5107	998,2900	992,9800	-2,5307	-5,3100
14/09/2006	L5TM	862,3674	856,7725	872,1700	9,8026	15,3975
17/11/2006	L5TM	812,1069	807,9983	827,4900	15,3831	19,4917
09/03/2007	L5TM	998,7894	1000,3029	1000,8900	2,1006	0,5871
26/04/2007	L5TM	1018,7910	1021,0674	1018,1100	-0,6810	-2,9574
12/05/2007	L5TM	1012,2219	1015,5590	1014,3900	2,1681	-1,1690
13/06/2007	L5TM	989,8533	991,1936	988,8000	-1,0533	-2,3936
29/06/2007	L5TM	960,9651	962,0331	971,1400	10,1749	9,1069
15/07/2007	L5TM	952,3827	952,2854	952,1200	-0,2627	-0,1654
31/07/2007	L5TM	931,6089	929,9225	931,2700	-0,3389	1,3475
17/09/2007	L5TM	837,0459	830,1057	860,9800	23,9341	30,8742
03/10/2007	L5TM	819,0612	814,2703	835,5000	16,4388	21,2297
28/04/2008	L5TM	1049,5269	1052,6983	1047,9500	-1,5769	-4,7483
17/07/2008	L5TM	1013,1516	1013,5624	1010,2000	-2,9516	-3,3624
02/08/2008	L5TM	988,3422	990,3139	991,1200	2,7778	0,8061
18/08/2008	L5TM	965,6613	964,7309	969,2900	3,6287	4,5591
05/10/2008	L5TM	879,7698	875,7022	885,4700	5,7002	9,7677
04/07/2009	L5TM	1038,4962	1042,2891	1036,2900	-2,2062	-5,9991
20/07/2009	L5TM	1023,5016	1026,6069	1022,3100	-1,1916	-4,2969
13/02/2010	L5TM	835,0740	831,5444	848,7600	13,6860	17,2156
21/06/2010	L5TM	820,9017	819,0948	829,5800	8,6783	10,4852

Continua na próx. página

Tabela B.1 – continuação da página anterior

Data	Sensor	Área (30 m)	Área (5 m)	Área CEMIG	Área CEMIG - (30 m)	Área CEMIG - (5 m)
07/07/2010	L5TM	801,5031	798,7235	815,3000	13,7969	16,5765
24/08/2010	L5TM	738,2484	733,1505	756,2900	18,0416	23,1395
24/06/2011	L5TM	1027,2888	1030,7053	1022,3100	-4,9788	-8,3953
10/07/2011	L5TM	1000,8846	1003,1002	999,4900	-1,3946	-3,6102
11/08/2011	L5TM	950,6538	948,5785	954,4400	3,7862	5,8615
27/08/2011	L5TM	916,6482	913,4586	920,1600	3,5118	6,7014
12/09/2011	L5TM	881,0937	877,0305	888,9700	7,8763	11,9395
28/09/2011	L5TM	844,3044	839,5762	855,3900	11,0856	15,8138
12/05/2013	L8OLI	735,9615	714,4326	746,2600	10,2985	31,8275
28/05/2013	L8OLI	722,0592	696,1279	731,5100	9,4508	35,3821
13/06/2013	L8OLI	718,9461	695,1551	726,4300	7,4839	31,2749
15/07/2013	L8OLI	681,3369	660,8853	693,9400	12,6031	33,0547
31/07/2013	L8OLI	658,5093	638,4763	674,0400	15,5307	35,5637
01/09/2013	L8OLI	606,9402	590,1080	627,9300	20,9898	37,8220
08/02/2014	L8OLI	537,3549	532,4697	554,7900	17,4351	22,3203
12/03/2014	L8OLI	496,6245	492,0634	516,7300	20,1055	24,6666
15/05/2014	L8OLI	476,5509	461,2212	490,5700	14,0191	29,3488
31/05/2014	L8OLI	464,9490	462,1144	478,7500	13,8010	16,6356
18/07/2014	L8OLI	431,1657	428,6146	443,4100	12,2443	14,7954
03/08/2014	L8OLI	422,9721	409,1408	434,4700	11,4979	25,3292
19/08/2014	L8OLI	412,8480	410,1281	425,5500	12,7020	15,4219
04/09/2014	L8OLI	405,2286	402,6779	416,8600	11,6314	14,1821
20/09/2014	L8OLI	390,7089	387,6457	407,7400	17,0311	20,0943

Continua na próx. página

Tabela B.1 – continuação da página anterior

Data	Sensor	Área (30 m)	Área (5 m)	Área CEMIG	Área CEMIG - (30 m)	Área CEMIG - (5 m)
06/10/2014	L8OLI	382,0410	380,2349	397,7700	15,7290	17,5351
07/11/2014	L8OLI	366,6231	363,3221	380,8900	14,2669	17,5679
10/01/2015	L8OLI	425,3913	421,1479	444,5000	19,1087	23,3521
21/07/2015	L8OLI	586,2789	582,2680	604,3900	18,1111	22,1220

Apêndice C

Tabela de Resultados de Nível de Água

Tabela C.1: Resultados de Altimetria (SWGTOOL) e Dados de referência (CEMIG)

Data	Estação <i>in situ</i> (m)	Estação SWG (m)	Diferença SWG Corrigida (m)
16/10/2002	560,5800	561,2091	560,6457943
20/11/2002	558,0300	559,7363	559,1730433
25/12/2002	558,0600	559,0006	558,4373092
29/01/2003	562,0500	562,8172	562,2538858
05/03/2003	564,1100	564,5737	564,0103926
09/04/2003	564,9300	565,7424	565,1791155
14/05/2003	564,5100	565,0081	564,4447776
18/06/2003	563,5000	564,4006	563,8372654
23/07/2003	562,1400	563,0213	562,4580341
27/08/2003	560,4100	560,3928	559,8295226
01/10/2003	558,4900	559,7922	559,2289053
05/11/2003	556,0400	556,9957	556,4323667
10/12/2003	555,9800	557,9343	557,3710423
14/01/2004	557,8400	558,2425	557,6792354
18/02/2004	562,5300	562,9447	562,3813569
24/03/2004	569,1200	569,7958	569,2325465
28/04/2004	571,3400	571,7750	571,2116651
02/06/2004	571,4700	572,2729	571,7096428
07/07/2004	571,2100	571,6402	571,0769306
11/08/2004	570,3700	570,2978	569,7344845
15/09/2004	568,9200	569,5037	568,9403926
20/10/2004	567,1500	567,7675	567,2041932

Continua na próx. página

Tabela C.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (<i>m</i>)	Estação SWG (<i>m</i>)	Diferença SWG Corrigida (<i>m</i>)
24/11/2004	565,8200	566,3468	565,7835465
31/12/2004	567,2700	567,5758	567,012517
03/02/2005	569,9500	570,4694	569,9061339
10/03/2005	571,0100	571,2463	570,6830226
14/04/2005	571,5400	572,0959	571,5325903
19/05/2005	571,5800	572,1984	571,6350919
23/06/2005	571,2500	571,6007	571,037387
28/07/2005	570,3600	570,4917	569,9284031
01/09/2005	569,0800	569,6012	569,0379547
06/10/2005	567,7300	568,4390	567,8756737
10/11/2005	566,2900	567,8347	567,2713833
15/12/2005	568,2100	568,2548	567,6915179
19/01/2006	568,5300	568,5677	568,0043973
23/02/2006	568,8900	568,9498	568,3865455
30/03/2006	571,3900	571,5639	571,0005748
04/05/2006	571,8900	572,4189	571,8555915
08/06/2006	571,4300	571,4830	570,9196919
13/07/2006	570,5700	571,1510	570,5876759
17/08/2006	569,2600	570,2713	569,708022
21/09/2006	567,8900	570,9391	570,3758056
26/10/2006	567,0800	566,9941	566,4307697
04/01/2007	569,1700	569,9549	569,3915854
08/02/2007	570,5500	571,3177	570,7544402
15/03/2007	571,2500	571,3985	570,8351648
19/04/2007	571,5600	571,9706	571,407286
24/05/2007	571,3000	571,4854	570,9221531
28/06/2007	570,5800	570,9743	570,4110438
02/08/2007	569,6300	569,7944	569,2310827
06/09/2007	568,3100	568,7324	568,169144
11/10/2007	566,7400	566,5241	565,9608457
15/11/2007	564,7500	565,5086	564,9453522
20/12/2007	562,6900	568,4939	567,9306372
24/01/2008	561,6000	563,0798	562,5165542
28/02/2008	567,8400	568,3382	567,7748848
03/04/2008	571,0700	571,4934	570,9301502
08/05/2008	572,2600	572,3528	571,7894842
12/06/2008	572,0300	572,5746	572,0113034

Continua na próx. página

Tabela C.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (<i>m</i>)	Estação SWG (<i>m</i>)	Diferença SWG Corrigida (<i>m</i>)
17/07/2008	571,3900	571,6496	571,0862852
21/08/2008	570,3900	570,8256	570,2623224
25/09/2008	568,9200	569,2204	568,6571429
30/10/2008	566,9300	567,5761	567,0128137
04/12/2008	565,7900	565,3314	564,7681456
09/01/2009	569,5400	569,8509	569,2876058
13/02/2009	570,8100	571,3604	570,7970792
20/03/2009	572,3000	572,2104	571,6470698
24/04/2009	572,4900	571,9292	571,3659017
29/05/2009	572,4700	572,2637	571,7004044
03/07/2009	571,9600	572,0154	571,4520606
07/08/2009	570,7000	571,2058	570,6425282
11/09/2009	569,0100	569,5852	569,0218766
16/10/2009	566,9800	567,6260	567,0626637
20/11/2009	566,2000	567,0124	566,4491492
25/12/2009	566,7300	566,6152	566,0519457
29/01/2010	567,8500	568,3765	567,8132268
05/03/2010	567,5400	567,7131	567,1498145
09/04/2010	568,8300	569,0864	568,523094
14/05/2010	568,2000	568,9140	568,3506788
18/06/2010	567,0100	567,0760	566,5127391
23/07/2010	566,0300	566,7467	566,1834489
27/08/2010	564,6700	565,3737	564,810454
01/10/2010	563,1300	563,1524	562,5890562
04/05/2013	564,7300	565,2305	564,6672086
08/06/2013	564,0500	564,2563	563,6930335
13/07/2013	562,9230	563,2021	562,6387696
17/08/2013	561,3660	561,6590	561,0956735
21/09/2013	559,5550	559,8903	559,326956
26/10/2013	557,9170	558,5748	558,0114896
30/11/2013	556,6440	556,6970	556,1336909
03/01/2014	559,0350	559,9061	559,3427787
07/02/2014	557,9480	558,6065	558,0431554
14/03/2014	556,2910	556,5942	556,0308735
18/04/2014	555,7970	556,4479	555,8845771
23/05/2014	555,0290	555,6064	555,0430801
27/06/2014	553,8800	554,5532	553,9899529

Continua na próx. página

Tabela C.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (<i>m</i>)	Estação SWG (<i>m</i>)	Diferença SWG Corrigida (<i>m</i>)
01/08/2014	552,8560	553,5849	553,0216286
05/09/2014	551,9730	552,5382	551,9748823
10/10/2014	550,9920	552,2916	551,7283176
14/11/2014	550,2920	550,8686	550,3053401
19/12/2014	552,6870	553,2950	552,7317091
23/01/2015	553,1480	553,6985	553,1351638

Apêndice D

Tabela de Resultados do Modelo

Tabela D.1: Dados de referência (CEMIG) e Resultados de Altimetria (SWGTOOLS)

Data	Estação <i>in situ</i> (m)	Área CEMIG (km ²)	$\Delta Volume_{CEMIG}$ (hm ³)	Nível (m)	Área _{Modelo 30m} (km ²)	$\Delta Volume_{Misto}$ (hm ³)
17/06/2000	567,81	859,93	261,8652	567,8441931	857,2068	271,7905342
20/08/2000	564,55	746,6	132,1721	564,4335263	736,5609	120,0205424
21/09/2000	562,71	690,08	107,2661	562,7325581	674,6418	93,2349955
27/01/2001	561,1	642,38	10,2386	561,2970262	624,3192	8,874774237
12/02/2001	560,94	637,66	186,7932	561,1549769	625,2147	149,9679597
20/06/2001	557,8	552,1	27,2992	558,5800488	539,6175	19,59774948
06/07/2001	557,3	539,87	59,4513	558,2119875	525,3003	42,2800688
07/08/2001	556,17	512,36	132,9151	557,3840738	496,0638	91,15521451
26/10/2001	553,4	447,33	-897,0611	555,4269959	435,4803	-743,9851102
07/06/2002	567,31	842,48	124,8232	567,319035	815,7519	127,4306321
25/07/2002	565,78	789,23	351,0765	565,7164763	774,5877	322,799305
13/10/2002	560,85	635	17,0349	561,074925	616,3236	26,54311362
16/10/2002	560,58	627,04	151,0574	560,6458	620,7407985	87,81608518
20/11/2002	558,03	557,73	-1,6725	559,173	571,804063	41,17024506
25/12/2002	558,06	558,47	-245,1749	558,4373	547,3570106	-233,1034517
29/01/2003	562,05	670,48	-144,4357	562,2539	674,1746393	-123,5451938
05/03/2003	564,11	731,81	-0,7327	564,0104	732,5400416	0,938216787
06/03/2003	564,12	732,11	-60,4201	563,99745	717,2784	-87,95448799
09/04/2003	564,93	759,75	31,6031	565,1791	771,3744975	55,7490351
14/05/2003	564,51	745,22	73,6711	564,4448	746,9738368	44,76639659
18/06/2003	563,5	713,6	94,298	563,8373	726,7873534	97,08033261
23/07/2003	562,14	673,15	112,0366	562,458	680,9581013	167,5118451

Continua na próx. página

Tabela D.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (m)	Área CEMIG (km ²)	$\Delta Volume_{CEMIG}$ (hm ³)	Nível (m)	Área _{Modelo 30m} (km ²)	$\Delta Volume_{Misto}$ (hm ³)
27/08/2003	560,41	622,04	114,3407	559,8295	593,6176312	35,05436267
01/10/2003	558,49	569,02	132,0838	559,2289	573,660254	147,4330729
05/11/2003	556,04	509,21	3,0508	556,4324	480,7365566	-46,58945423
10/12/2003	555,98	507,75	-98,6597	557,371	511,9269752	-15,93503925
14/01/2004	557,84	553,08	-290,2666	557,6792	522,1676484	-282,2631589
18/02/2004	562,53	684,73	-524,0736	562,3814	678,4102626	-542,7761152
24/03/2004	569,12	905,79	-212,4193	569,2325	906,0623512	-185,8280683
28/04/2004	571,34	1007,87	-13,136	571,2117	971,8247259	-48,80669832
02/06/2004	571,47	1013,92	24,1991	571,7096	988,3715828	-43,11033199
06/07/2004	571,23	1002,75	2,0004	572,1423613	1004,1633	105,0254176
07/07/2004	571,21	1001,82	68,0194	571,0769	967,3477513	-6,991957916
07/08/2004	570,52	969,75	14,4964	571,1492263	966,9195	133,6690699
11/08/2004	570,37	962,79	41,9142	569,7345	922,7408028	-55,02217459
23/08/2004	569,93	942,39	62,0994	570,3258275	938,1816	86,13319883
08/09/2004	569,26	911,37	30,775	569,39228	907,1064	40,74806833
15/09/2004	568,92	898,78	40,9699	568,9404	896,3546295	36,45655491
24/09/2004	568,46	882,67	112,6316	568,5285531	874,071	113,4138823
20/10/2004	567,15	836,9	75,525	567,2042	838,6640035	82,37723768
11/11/2004	566,23	804,87	32,7054	566,1871625	781,2918	31,73936148
24/11/2004	565,82	790,62	7,8917	565,7835	791,4585978	10,0832209
27/11/2004	565,72	787,15	-126,1918	565,65388	763,7958	-108,4253965
31/12/2004	567,27	841,08	-239,1076	567,0125	832,2949647	-254,7452645

Continua na próx. página

Tabela D.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (m)	Área CEMIG (km ²)	$\Delta Volume_{CEMIG}$ (hm ³)	Nível (m)	Área _{Modelo 30m} (km ²)	$\Delta Volume_{Misto}$ (hm ³)
03/02/2005	569,95	943,31	1,8875	569,9061	928,4443907	-39,24852586
15/02/2005	569,93	942,39	-104,4868	570,3258275	941,8977	-33,86489784
10/03/2005	571,01	992,52	-51,2246	570,683	954,2589348	-183,8396411
04/04/2005	571,52	1016,25	-2,0292	572,5486438	1016,5554	101,5567755
14/04/2005	571,54	1017,18	-4,0764	571,5326	982,4884616	-10,08812082
19/05/2005	571,58	1019,04	33,3766	571,6351	985,8943965	58,33384733
23/06/2005	571,25	1003,68	31,8804	571,0374	966,0337934	-66,99256773
09/07/2005	570,93	988,8	55,6079	571,7225356	989,5293	172,1213319
28/07/2005	570,36	962,33	119,4671	569,9284	929,1843519	81,4217422
01/09/2005	569,08	904,39	118,9065	569,038	899,5964352	102,3139971
06/10/2005	567,73	857,14	29,784	567,8757	860,9760329	40,81600034
13/10/2005	567,38	844,92	90,0291	567,3924669	828,4041	10,10624496
10/11/2005	566,29	806,95	-161,3672	567,2714	840,8966044	-35,6222331
15/12/2005	568,21	873,92	-28,1453	567,6915	854,8568825	-26,90935776
19/01/2006	568,53	885,12	-32,09	568,0044	865,2532763	-33,30812414
23/02/2006	568,89	897,73	-238,4912	568,3865	877,9513386	-240,8516849
30/03/2006	571,39	1010,2	-55,2279	571,0006	964,8105945	-212,8078168
23/04/2006	571,93	1035,36	4,1354	573,1237588	1039,7997	128,9105299
04/05/2006	571,89	1033,49	47,0499	571,8556	993,2211816	91,50028368
08/06/2006	571,43	1012,06	41,1006	570,9197	962,1230088	-90,89690346
26/06/2006	571,02	992,98	44,2148	571,8483325	995,5107	122,6997996
13/07/2006	570,57	972,07	123,3651	570,5877	951,0907424	82,37748935

Continua na próx. página

Tabela D.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (m)	Área CEMIG (km ²)	$\Delta Volume_{CEMIG}$ (hm ³)	Nível (m)	Área _{Modelo 30m} (km ²)	$\Delta Volume_{Misto}$ (hm ³)
17/08/2006	569,26	911,37	98,098	569,708	921,8615043	133,4127132
14/09/2006	568,16	872,17	23,4175	568,2125556	862,3674	-195,3866914
21/09/2006	567,89	862,73	68,736	570,3758	944,050692	346,5744179
26/10/2006	567,08	834,46	16,6205	566,4308	812,9646023	-35,51931369
17/11/2006	566,88	827,49	-198,6602	566,8679113	812,1069	-217,4717878
04/01/2007	569,17	907,55	-129,6301	569,3916	911,3469134	-127,2892013
08/02/2007	570,55	971,14	-63,1064	570,7544	956,6320038	-130,2256721
09/03/2007	571,19	1000,89	-6,0135	572,086385	998,7894	122,5009434
15/03/2007	571,25	1003,68	-31,3375	570,8352	959,3143322	-55,42821736
19/04/2007	571,56	1018,11	0	571,4073	978,3248373	-119,5607378
26/04/2007	571,56	1018,11	8,1317	572,60462	1018,791	11,36885044
12/05/2007	571,48	1014,39	18,1829	572,4926675	1012,2219	155,0432752
24/05/2007	571,3	1006,01	36,9035	570,9222	962,2047886	-78,11965861
13/06/2007	570,93	988,8	34,3211	571,7225356	989,8533	126,8917467
28/06/2007	570,58	972,54	2,9184	570,411	945,2215913	-74,34270587
29/06/2007	570,55	971,14	39,4242	571,1910587	960,9651	54,76073037
15/07/2007	570,14	952,12	42,3774	570,6186513	952,3827	59,1083539
31/07/2007	569,69	931,27	5,5791	569,9911712	931,6089	69,83779814
02/08/2007	569,63	928,49	119,1907	569,2311	906,0137118	94,33950703
06/09/2007	568,31	877,42	40,8499	568,1691	870,7274969	25,04889491
17/09/2007	567,84	860,98	61,925	567,8757925	837,0459	63,49680333
03/10/2007	567,11	835,5	30,6746	567,1089725	819,0612	92,79224447

Continua na próx. página

Tabela D.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (m)	Área CEMIG (km ²)	$\Delta Volume_{CEMIG}$ (hm ³)	Nível (m)	Área _{Modelo 30m} (km ²)	$\Delta Volume_{Misto}$ (hm ³)
11/10/2007	566,74	822,61	156,8242	565,9608	797,3499159	79,25708352
15/11/2007	564,75	753,52	148,6288	564,9454	763,6069834	-242,7647776
20/12/2007	562,69	689,48	73,3937	567,9306	862,802367	418,4287528
24/01/2008	561,6	657,16	-473,6636	562,5166	682,9026167	-405,0307002
28/02/2008	567,84	860,98	-299,789	567,7749	857,6270081	-287,1445408
03/04/2008	571,07	995,31	-114,3963	570,9302	962,4705182	-257,4009667
28/04/2008	572,19	1047,49	-7,3446	573,4888113	1049,5269	173,3782171
08/05/2008	572,26	1050,75	24,0418	571,7895	991,0245615	-22,06458111
12/06/2008	572,03	1040,02	65,6085	572,0113	998,3951966	-35,73170186
17/07/2008*	571,39	1010,2	39,0453	571,0863	1013,1516	-73,46074004
02/08/2008	571	992,05	48,0519	571,8203444	988,3422	66,92095423
18/08/2008	570,51	969,29	11,5976	571,1353819	965,6613	83,19999819
21/08/2008	570,39	963,72	136,8967	570,2623	940,2798614	146,6510206
25/09/2008	568,92	898,78	33,9012	568,6571	886,9427771	3,91539803
05/10/2008	568,54	885,47	138,0321	568,6128188	879,7698	136,966406
30/10/2008	566,93	829,23	92,2734	567,0128	832,3048239	178,4537577
04/12/2008	565,79	789,58	-321,3581	564,7681	757,7187437	-376,3830423
09/01/2009	569,54	924,33	-121,1313	569,2876	907,8918683	-140,8293954
13/02/2009	570,81	983,22	-151,6691	570,7971	958,0488193	-82,63359111
20/03/2009	572,3	1052,62	-20,0844	571,6471	986,2924023	27,60005894
24/04/2009	572,49	1061,5	2,1241	571,3659	976,9497154	-32,86512798
29/05/2009	572,47	1060,5601	53,4763	571,7004	988,0646076	24,43550432

Continua na próx. página

Tabela D.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (m)	Área CEMIG (km ²)	$\Delta Volume_{CEMIG}$ (hm ³)	Nível (m)	Área _{Modelo 30m} (km ²)	$\Delta Volume_{Misto}$ (hm ³)
03/07/2009	571,96	1036,76	1,0375	571,4521	979,8126126	-171,524782
04/07/2009	571,95	1036,29	30,8777	573,1517487	1038,4962	43,37715052
20/07/2009	571,65	1022,31	95,0212	572,7310194	1023,5016	206,3862588
07/08/2009	570,7	978,11	158,8645	570,6425	952,9133823	150,0703663
11/09/2009	569,01	901,94	175,8929	569,0219	899,0621883	169,768089
16/10/2009	566,98	830,97	63,7542	567,0627	833,9612463	50,53938024
20/11/2009	566,2	803,82	-43,0885	566,4491	813,5753178	32,05337743
25/12/2009	566,73	822,26	-94,2806	566,0519	800,3769949	-146,1227571
29/01/2010	567,85	861,33	30,7804	567,8132	858,9010408	25,8495787
13/02/2010	567,49	848,76	-4,2471	567,5080325	835,074	29,94579173
05/03/2010	567,54	850,5	-112,6288	567,1498	836,8571019	-118,0571072
09/04/2010	568,83	895,63	55,7302	568,5231	882,4885848	15,16605444
14/05/2010	568,2	873,57	101,4828	568,3507	876,7595539	155,5308514
18/06/2010	567,01	832,02	5,8162	566,5127	815,6882907	-34,21058205
21/06/2010	566,94	829,58	33,7178	566,9308106	820,9017	34,86203006
07/07/2010	566,53	815,3	40,3302	566,5010531	801,5031	25,50758801
23/07/2010	566,03	797,91	93,2529	566,1834	804,7465979	112,5076327
24/08/2010	564,83	756,29	12,0589	564,7251469	738,2484	-6,386828469
27/08/2010	564,67	750,75	111,904	564,8105	759,1245723	160,4333813
01/10/2010	563,13	702,57	-733,7373	562,5891	685,3117191	-867,24544
24/06/2011	571,64	1021,84	47,5155	572,7168756	1027,2888	66,77545395
10/07/2011	571,17	999,96	94,8078	572,0583969	1000,8846	132,3221708

Continua na próx. página

Tabela D.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (<i>m</i>)	Área CEMIG (<i>km</i> ²)	$\Delta Volume_{CEMIG}$ (<i>hm</i> ³)	Nível (<i>m</i>)	Área _{Modelo 30m} (<i>km</i> ²)	$\Delta Volume_{Misto}$ (<i>hm</i> ³)
11/08/2011	570,2	954,9	70,3147	570,7023162	950,6538	97,61338412
27/08/2011	569,45	920,16	74,1606	569,6568144	916,6482	85,32043855
12/09/2011	568,63	888,62	82,8415	568,7076188	881,0937	86,27475874
28/09/2011	567,68	855,39	237,2134	567,7075625	844,3044	243,0260079
04/05/2013	564,73	752,83	14,2415	564,6672	754,3647972	18,17554104
12/05/2013	564,54	746,26	31,0319	564,423295	735,9615	32,36086056
28/05/2013	564,12	731,51	5,1159	563,9793937	722,0592	20,67598367
08/06/2013	564,05	730,02	7,2805	563,693	721,9947994	-9,616633647
13/06/2013	563,95	726,43	73,0764	563,8265106	718,9461	83,49282935
13/07/2013	562,923	696,62	5,7671	562,6388	686,9636031	-14,36405862
15/07/2013	562,84	693,94	46,3772	562,8487244	681,3369	40,12110725
31/07/2013	562,162	674,04	52,7084	562,2498331	658,5093	74,68559788
17/08/2013	561,366	650,36	47,3624	561,0957	635,6894331	14,50896588
01/09/2013	560,625	627,93	65,5369	560,8621531	606,9402	90,8728066
21/09/2013	559,555	597,05	94,3562	559,327	576,9182929	73,01668075
26/10/2013	557,917	555,04	68,6681	558,0115	533,2078293	94,26736767
30/11/2013	556,644	523,79	-132,2637	556,1337	470,8121261	-168,1973007
03/01/2014	559,035	582,56	61,8668	559,3428	577,4440489	72,23982093
07/02/2014	557,948	555,77	3,3858	558,0432	534,2600246	-33,10480776
08/02/2014	557,887	554,79	82,241	558,6610044	537,3549	59,21680627
12/03/2014	556,352	516,73	3,1463	557,5155888	496,6245	71,56477199
14/03/2014	556,291	515,28	25,1621	556,0309	467,3956974	6,802270928

Continua na próx. página

Tabela D.1 – continuação da página anterior

Data	Estação <i>in situ</i> (m)	Área CEMIG (km ²)	$\Delta Volume_{CEMIG}$ (hm ³)	Nível (m)	Área _{Modelo 30m} (km ²)	$\Delta Volume_{Misto}$ (hm ³)
18/04/2014	555,797	503,39	26,0927	555,8846	462,5345454	-39,61659794
15/05/2014	555,272	490,57	11,8496	556,7283044	476,5509	76,77242007
23/05/2014	555,029	484,78	11,9941	555,0431	434,5731892	-59,79578791
31/05/2014	554,78	478,75	42,1463	556,3725813	464,949	102,99253359
27/06/2014	553,88	457,81	29,7858	553,99	399,5797615	-54,79061809
18/07/2014	553,219	443,41	15,9523	555,3090241	431,1657	91,33225427
01/08/2014	552,856	435,56	1,9143	553,0216	367,4041743	-79,76264204
03/08/2014	552,812	434,47	17,6319	555,0399747	422,9721	11,21870352
19/08/2014	552,402	425,55	17,0575	554,7715269	412,848	10,69739964
04/09/2014	551,997	416,86	0,9991	554,5100013	405,2286	93,52704907
05/09/2014	551,973	416,21	16,3568	551,9749	332,6227722	-81,76008406
20/09/2014	551,576	407,74	18,2843	554,235535	390,7089	11,59307168
06/10/2014	551,122	397,77	5,1543	553,9354878	382,041	77,96507628
10/10/2014	550,992	395,17	25,455	551,7283	324,4298914	-58,71073607
07/11/2014	550,336	380,89	1,6743	553,427485	366,6231	100,4971823
14/11/2014	550,292	380,03	-97,2246	550,3053	277,1470378	-77,02723527
19/12/2014	552,687	431,86	-25,3697	552,7317	357,7706961	-102,2072768
10/01/2015	553,266	444,5	5,2288	555,3418275	425,3913	87,88788645
23/01/2015	553,148	441,88	-348,5119	553,1352	371,1767353	-335,9976868
21/07/2015	559,81	604,39	16917,1786	560,1537175	586,2789	

Apêndice E

Artigo Apresentado no evento SPIE
Remote Sensing 2014

A model based on satellite altimetry and imagery to evaluate water volume changes in a reservoir in Brazil

Luiza Gontijo Álvares de C. Abreu^a and Philippe Maillard^a

^aUniv. Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, Brazil;

ABSTRACT

Different satellite missions have instruments to measure the water level variation of oceans and some of these instruments are being used in continental water applications with satisfying results. Altimeters on-board the Envisat and SARAL(Altika) satellites are consistently used to measure the water level in continental water bodies. Recent studies on satellite altimetry combined with satellite imagery have shown the great potential of this technique to estimate the water volume of rivers, lakes, wetlands and reservoirs and its temporal variation in response to climate and other environmental variables. A consistent monitoring of water level variations in reservoirs is crucial to the development policies and implementation of actions regarding the distribution and use of the stored water resource. The Três Marias reservoir is located within the São Francisco river basin, known as the “national integration” river, which provides water flow to the semi-arid region of Brazil. This study presents a method to combine satellite altimetry and imagery of the lake’s surface to estimate volume changes and create a model from which volume changes could be computed from either the altimetry or the lake’s surface area. Our intention with this study is to evaluate the method and its precision, and the possibility to apply it in other areas, such as wetlands and other lakes where *in situ* measurements are not available. Moreover, data of monitoring stations usually have an arbitrary altitude reference and are not available for the general public; the data from the satellite altimetry has the advantage of being of global reference (geoid) and compatible with the establishment of a worldwide lake and reservoir database. We combined Envisat and SARAL/Altika altimetry data from 2007-2014 period with Landsat imagery from the same time frame. The data was corrected using a novel processing technique resulting in a relative precision of 0.24 m (RMSE).

Keywords: Altimetry, Water level, Envisat, SARAL, water volume, lake monitoring, remote sensing

1. INTRODUCTION

The São Francisco river basin is the largest national watershed contained completely within the Brazilian territory and plays an important role regarding energy generation and water supply for the semi-arid region of Brazil.¹ The river has its source at the Serra da Canastra National Park, in the state of Minas Gerais, and flows throughout four other states (Bahia, Pernambuco, Sergipe and Alagoas) being known as the “national integration” river.² The main reservoirs of the basin are located on the São Francisco river channel. The Sobradinho, Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso and Xingó reservoirs are located on the lower third of the river and only the Três Marias reservoir is located on the river’s upper third (18°15’ and 19°S; 44°18’ and 45°29’W).

Measuring water level surface of continental water bodies, inland seas, lakes, reservoirs or river systems, can be very challenging, specially when the number of *in situ* gauges and effective monitoring networks is declining.³ The use of satellite altimetry for hydrology has advanced rapidly in the last three decades and improved significantly in recent years^{4,5}. Different satellites have on-board altimeters for measuring the level variations of the ocean and some of these instruments are being used for continental waters with satisfying results. Several studies were published regarding the use of satellite altimeters available from different missions to monitor rivers and lakes worldwide.⁶⁻⁹

The systematic monitoring of water storage variation in reservoirs, with regularity and precision, is of utmost importance for understanding the environmental processes of the surrounding areas, the interference of the

Further author information: (Send correspondence to L. Abreu)

L. Abreu: E-mail: luizagontijoaca@ufmg.br, Telephone: +55 31 123 1234

P. Maillard: E-mail: philippe@ufmg.br, Telephone: +55 (31) 98 76 54 32

Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI, edited
by Christopher M. U. Neale, Antonino Malfese, Proc. of SPIE Vol. 9239, 92391B
© 2014 SPIE · CCC code: 0277-786X/14/\$18 · doi: 10.1117/12.2067270

climate changes on the water availability and better use of the water supply for different sectors of the society. Due to the complexity of the factors in which the balance of input and output of water from reservoirs depends on, individually monitoring each one of them is not feasible.^{10,11}

Bearing in mind the advantages of satellite altimetry, such as the ability to monitor areas of difficult access, global coverage and near-real time availability of data measurements,¹² recent studies about satellite altimetry combined with imagery have shown the great potential of these techniques to estimate water volume and its variation in response to climate changes and other environmental variables.¹³⁻¹⁵

The objective of this paper consists in presenting a method that combines satellite altimetry from Envisat and SARAL and Landsat imagery of the Três Marias Reservoir Lake's surface area to model the volume variations and to evaluate the accuracy of the approach.

2. STUDY AREA AND DATA

2.1 Study Area

The Upper São Francisco Region, where the Três Marias Reservoir is located, starts at the Serra da Canastra and ends the mouth of the Velhas River, one of the most important São Francisco's tributaries. With a total area of $\approx 100.000km^2$ and altitudes varying from 600 to 1600 m. The predominant vegetation types are savanna and fragments of semi-deciduous rain forest. The climate of the region is classified as tropical humid tampered by the altitude, with 1100 to 2000 mm annual precipitations, most of which falls during the rainy season (October to April) leaving less than 10% during the dry season (May to September). The main cities of the Upper São Francisco region are Belo Horizonte, and its metropolitan area, Divinópolis and Sete Lagoas. The total population of the region is approximately of 6.38 million inhabitants.²

The Três Marias Reservoir was built to regulate the São Francisco river flow, control floods, enable the navigation between the cities of Pirapora and Juazeiro, and the to promote the creation of irrigation projects.¹⁶ The building of the reservoir's dam began in 1957 and was concluded in 1961 being one of the oldest reservoirs in Brazil and also one of the largest in terms of flooded area (Figure 1). In addition to the aforementioned uses, the Três Marias reservoir is also responsible for the production of hydroelectric power that began in 1962.¹⁷ Some of the characteristics of the hydroelectric power plant are described in Table 1.

Table 1. Três Marias Power Plant characteristics.

Três Marias Reservoir	
Number of Municipalities	8
Length of the Dam	2700 meters
Height of the Dam	75 meters
Generation Units	6 turbines
Installed Power	396 Mega Watts

Since its closure, the energy company of Minas Gerais' state (CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais) has monitored the water level of the lake at a local station situated at the dam. This station consists in a marked ruler that is read by a CEMIG employee and inserted into a spreadsheet.

2.2 Altimetry Data

The surface elevation recorded by altimetry satellites was first used to study phenomena like "El Niño" and "La Niña" and ocean level variations, but applications in continental and coastal hydrology have increased significantly in recent years.¹⁸ The principle behind satellite altimetry is relatively simple and consists in calculating the difference between the satellite's above ground level (AGL, measured) and its above mean sea level (AMSL) altitude (pre-determined). The antenna on the satellite sends out microwave impulses that travel at near speed of light through the atmosphere and are scattered and reflected by the Earth's surface. The amount of time that

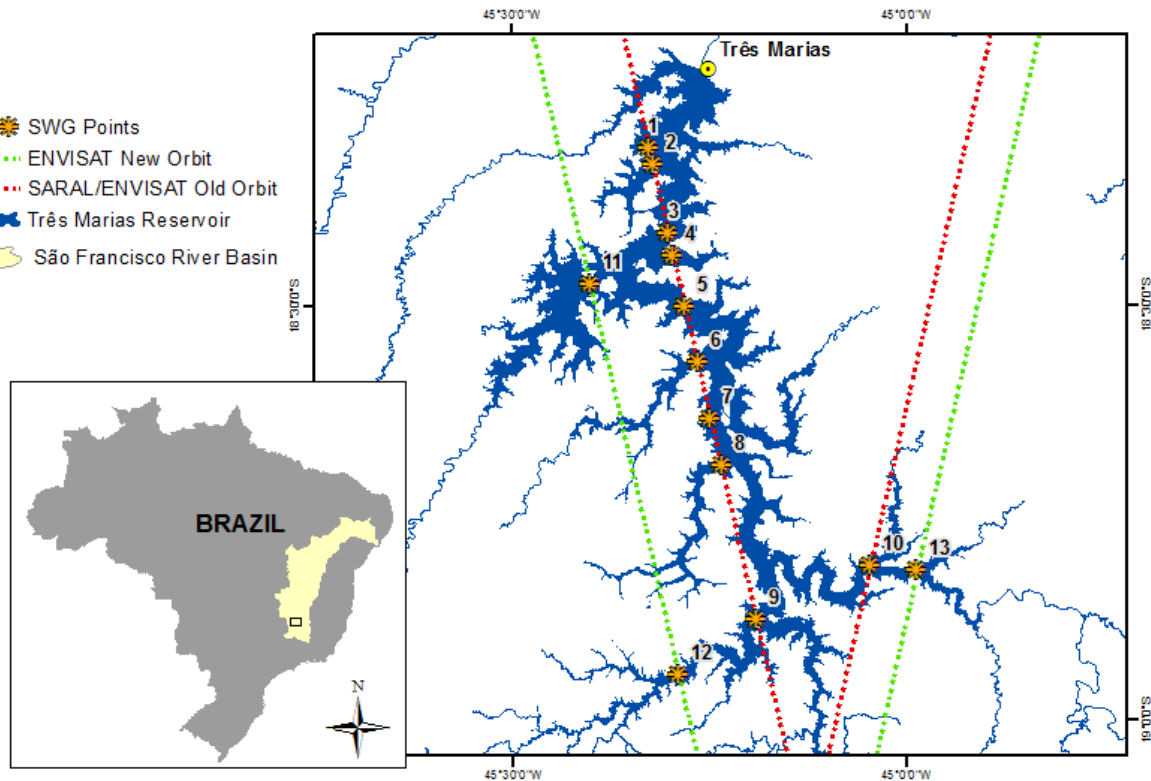


Figure 1. Study area location and crossing ground tracks from Evisat/SARAL.

the impulses take to return to the antenna is converted into distance and half of this distance is the AGL altitude. As the AMSL altitude of the satellite is a known value, the difference between the two is the surface elevation.³ The use of satellite altimetry data has the benefit of being of global reference (geoid).

Various online services provide altimetry-derived water level products. The altimetry data from Envisat was obtained from the CTOH Database¹⁹ that allows the registered user to choose the parameters, time frame and area of interest. The data for SARAL/AltiKa was obtained at the AVISO website.²⁰ Both satellites share the same orbital paths and return cycles for two different periods, Envisat from March 2002 to October 2010 and SARAL from March 2013 until the present. Envisat was moved to a different orbit after some problems with the satellite in 2010 and completely stopped sending data on April 2012.

2.2.1 Envisat

Envisat was launched in 2002 with the purpose of continuing the observations made by the ERS satellite series' and expanding the monitored environmental variables to enable more effective results in understanding the Earth's processes. The project was developed by the member countries of the European Space Agency and Canada having 10 instruments on board.²¹ One of those instruments was the RA-2 altimeter, from which the data is used in this study. Gardini *et al.*²² describe all the Envisat instruments, their characteristics and information. On April 2012 the contact with Envisat was lost and the data collection was finished.

Since there were no usable data for the Três Marias reservoir area in 2011 and 2012 for the new Envisat orbit, only data from the old Envisat orbit were used in this study.

2.2.2 SARAL/AltiKa

The SARAL(AltiKa) Project is an Indo-French collaboration satellite mission that orbits the same trajectory as ENVISAT's old orbit, ensuring the continuity and consistency of the altimetry data in the long term.^{23,24} The satellite has four instruments on board, one of them being the altimeter-radiometer AltiKa, (see Richard *et al.*²⁵ for a complete characterization of the instrument).

2.2.3 *In situ* Gauging Data

In Brazil, the monitoring of rivers is done mostly by the Brazilian water agency (ANA), and of reservoirs by the company (or companies) responsible for the energy generation. In the case of Três Marias Reservoir, Minas Gerais Energy Company CEMIG, does the monitoring. Traditionally the water level of reservoirs is measured by *in situ* stations located in strategic spots such as river mouths, bridges and/or dams. The water level data for Três Marias was provided by CEMIG covering daily water level measurement from November 10th, 2006 to April 21st, 2014.

2.3 Landsat Data

The imagery data used in this study was acquired from the United States Geological Survey (USGS) online platform named GloVis (Global Visualization Viewer). Images from the Landsat-5 TM and Landsat-8 OLI missions were selected considering the best possible match of the dates of passage of the SARAL and Envisat satellites and the quality of the images taking into account the cloud coverage over the Três Marias reservoir. Data from Landsat-7 could not be used because of the Scan Line Corrector (SLC) failure that started in 2003. Table 2 gives the list of images and their acquisition dates.

Table 2. Dates and type of Landsat sensor.

Imagery Date	Sensor	Altimetry Date
June 29th, 2007	Landsat-5 TM	June 28th, 2007
July 31st, 2007	Landsat-5 TM	August 2nd, 2007
July 17th, 2008	Landsat-5 TM	July 17th, 2008
August 18th, 2008	Landsat-5 TM	August 21st, 2008
July 4th, 2009	Landsat-5 TM	July 3rd, 2009
August 24th, 2010	Landsat-5 TM	August 27th, 2010
July 15th, 2013	Landsat-8 OLI	July 13th, 2013
February 8th, 2014	Landsat-8 OLI	February 7th, 2014
March 12th, 2014	Landsat-8 OLI	March 14th, 2014

3. METHOD

3.1 Altimetry Processing

Radar satellite altimetry data for hydrology purposes can be difficult to process without the use of an application tool. For that matter a program called SWGTOOL was developed³ using Python 2.7 environment. Python is an interpreted language ideal for enabling future contributions to be added since it is vastly used as an open-end programming environment. SWGTOOL can be used for extracting altimetry data for lakes or rivers, depending on the user's needs.

Satellite altimetry data (see section 2.2) needs a series of corrections and pre-processing procedures. The parameters to apply when executing these procedures are provided with the data when requesting it from CTOH and Aviso+. The ground altitude is a result of the subtraction from satellite's altitude α_s of the range ρ , and correcting it considering the atmospheric phenomena that delay propagation being the variations of the

ionosphere (*iono*), pressure (dry troposphere: *dry*) and humidity (wet troposphere: *wet*); also the solid earth (*set*) and polar (*pt*) tides that generate crustal vertical motions are considered as well. Another correction makes the resulting altitude relative to the geoid datum (*GC*) instead of the rotation ellipsoid (Equation 1).²⁶

$$H_w = \alpha_s - (\rho + \textit{iono} + \textit{dry} + \textit{wet} + \textit{pt} + \textit{set}) + GC \quad (1)$$

The orbital specifications of the satellite mission arbitrate the temporal resolution and the spatial location and density of the ground tracks. In the case of Três Marias Reservoir two ground tracks referring to the old and new orbits of Envisat and SARAL cross the lake surface (as shown in Figure 1).⁴ For the tracks that use the old orbit paths we selected ten different crossing point coordinates. For each satellite gauging station coordinate a geoid correction value was calculated using the UNAVCO's Geoid Height Calculator on-line and applied to the correction and extraction of the altimetry data (Table 3).

Table 3. SWG Station coordinates and Geoid correction values

SWG Station	Coordinates	Geoid Value
1	-18.310;-45.328	-11.508
2	-18.331;-45.322	-11.475
3	-18.413;-45.304	-11.349
4	-18.441;-45.297	-11.308
5	-18.503;-45.282	-11.223
6	-18.568;-45.267	-11.137
7	-18.637;-45.250	-11.050
8	-18.696;-45.236	-10.977
9	-18.880;-45.193	-10.733
10	-18.815;-45.048	-10.828

The coordinates of the satellite data points serve as reference for SWGTOOL to extract the water level within a pre-determined threshold set by the user.³ Also, it uses the outline from an ESRI shapefile representing the reservoir to select the measurements comprised between two lines (representing the lake banks), that represent an area considered as water surface. Sometimes the program considers a measurement between two lines of the shapefile that do not correspond to water surface, but a land area. Figure 2a illustrated this problem as well and Figure 2b shows the graphic output of the altimetry points given by SWGTOOL. In future adjustments in the program this error will be corrected.

3.2 Landsat Imagery Processing and Classification

Once the Landsat-5 TM and Landsat-8 OLI image dates were selected and the blue, red, green, near infrared and short wave infrared bands from both sensors were downloaded from GloVis, the images were processed using ERDAS Imagine software for the geometric and atmospheric corrections.²⁷

3.2.1 Imagery corrections

The geometric correction is a fundamental step in pre-processing satellite images allowing it to be put into appropriate projection reducing the effects of geometric distortions.²⁸ The image layers were selected and combined into one ".tif" file, reprojected to UTM Zone 23 South (WGS 84) and corrected using ground control points from a previously corrected image from the "Global Land Cover Facility" catalogue online.²⁹

The atmospheric correction of satellite images is important to improve the results of classification algorithms and to be able to compare imagery with different acquisition dates, once corrected for atmospheric effects the changes observed in the images can be solely attributed differences in the surface features.³⁰ Two examples of the corrected images are shown in Figure 3.

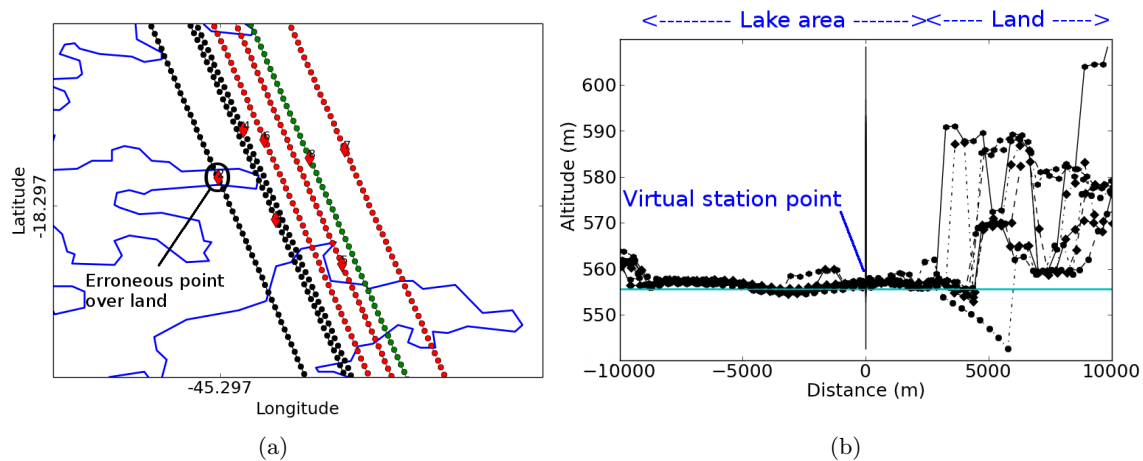


Figure 2. Illustration of the graphical output from SWGTOOL: a) Tracks near SWG Point 2, the data refers to cycles 2 to 8 from Saral in 2013. The number 2 point is located outside the limit of the water surface but between two lines in the shapefile; b) altimetry points from seven tracks used to average water level.

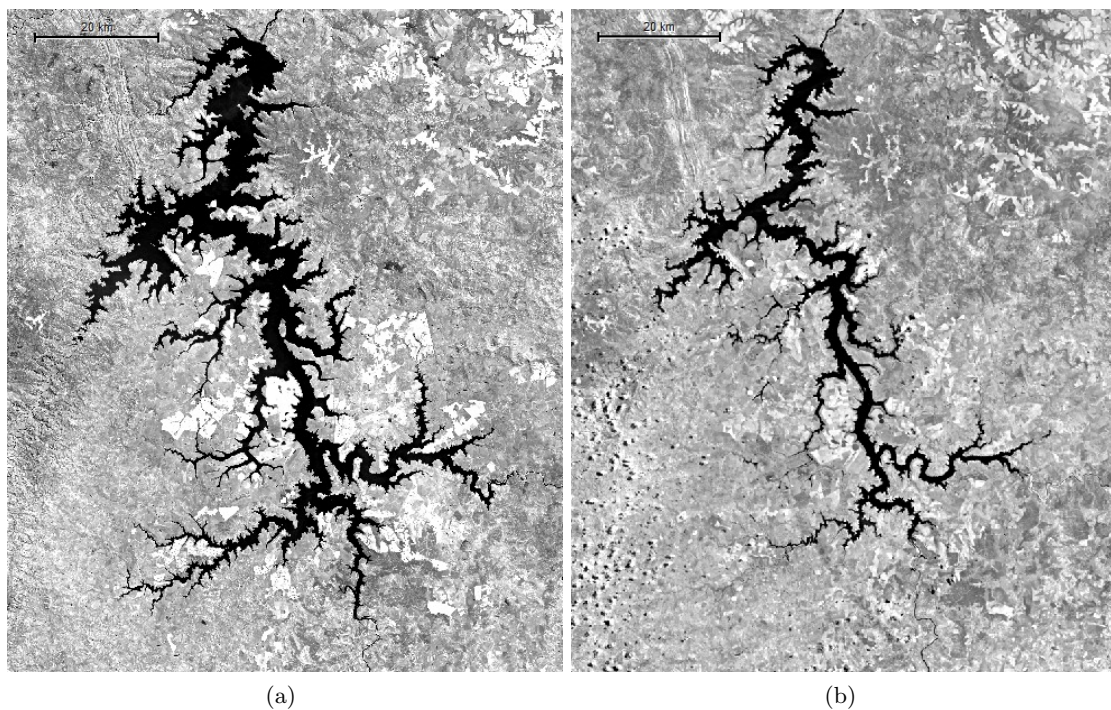


Figure 3. Landsat images of the Três Marias reservoir after corrections: (a) Landsat-5 TM infrared band image (29/06/2007) (band 4) and (b) Landsat-8 OLI infrared band image (12/03/2014) (band 5)

3.2.2 Classification

The classification process of the nine Landsat images of the Três Marias reservoir consisted in the extraction of the water surface area from the corrected images using eCognition software.³¹ The images were loaded in the software and only the subset comprising the reservoir area was selected to make the classification process run faster. Since the main objective of the image classification was to separate the water surface, only two classes

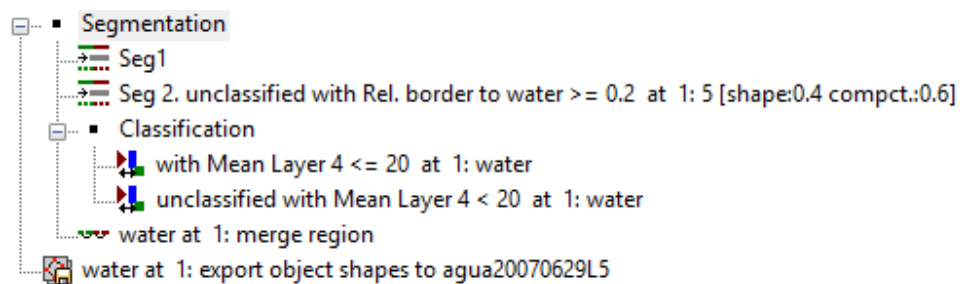


Figure 4. Tree structure of the classification process used to classify the nine Landsat-5 TM images and export the features to an ESRI shapefile using eCognition.

were created: “water” “unclassified”. The structure of the classification process is shown in Figure 4.

The images were first segmented using a “multiscale” algorithm. Then the “water” class was assigned to the objects (segments) in the image that responded to a set of rules created using the infrared band values of the object. The near infrared band has been widely used in other studies as the best spectral band to separate water from dry land.^{32,33} A further refinement was added to include areas of water that had been left out by the too restrictive first rule. This time a rule of “relation to border” was used to make sure the newly found segments were connected to the main reservoir. Lastly, the resulting “water” objects were merged into one single continuous object.

The “water” class was then exported into an ESRI shapefile file (Environmental Systems Research Institute, Inc.) and the resulting area of the reservoir for each image were calculated using a “Geometry” function in ArcGIS 10.³⁴ Finally the remaining objects not belonging to the reservoir were deleted.

4. RESULTS

The results are presented in three sections, where the information regarding the reservoir area, the altimetry and the relation between them with volume are analysed.

4.1 Reservoir Area

The classification method used to obtain the “water” class used to establish the reservoir area was very successful in separating the object of interest in the imagery from the rest. The use of the infrared band mean value of the segmented objects to classify them as water proved to be the most effective on account of the behaviour of water in this spectral range.³⁵ Due to the presence of other water bodies not belonging to the reservoir, the exported shapefile of the classification had to be edited by deleting the unwanted features.

The water surface area of the Três Marias reservoir in the Landsat imagery used tended to decrease with time, reaching its lowest level in March 2014 (last date analysed) (see Table 5).

The area values presented are consistent with the water level measurements of the last few years and the *in situ* gauge data show very low levels. At the time of the final submission of this article (August 2014) the Três Marias reservoir was at less than 8% of its total capacity (http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_diario/). Other three images of different dates (17 November 2006, 12 May 2007 and 1 July 2011) were also used to produce surface areas using the same procedures (see 3) as a means to validate our approach so that the corresponding level was calculated based on the area and could be compared with the regression curve of our model (see section 4.3).

4.2 Watel levels

The SWGTOOL (see Ref. 3 for a full description of SWGTOOL) was used to produce the water level measurements in ten different virtual gauging stations of Envisat and SARAL. From all available results the ones that corresponded to the dates which combined satellite imagery and the *in situ* gauging data were selected (table 4).

Table 4. SWGTOOLS results for the selected dates and the 10 virtual gauging stations.

Date	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
28/06/2007	571.59	571.29	568.06	572.31	569.41	571.86	571.95	572.60	572.51	572.49
02/08/2007	570.65	568.95	571.09	570.44	571.21	571.08	570.82	570.95	570.86	571.28
17/07/2008	572.31	572.85	572.56	572.75	572.86	572.95	572.86	572.21	573.33	573.69
21/08/2008	571.19	571.18	572.01	571.56	571.47	571.62	571.77	571.55	572.26	572.65
03/07/2009	570.01	573.22	573.90	573.87	573.51	573.42	574.05	574.20	574.34	574.46
27/08/2010	563.88	566.07	566.70	566.81	566.49	566.26	566.85	566.63	566.80	567.19
13/07/2013	563.63	564.31	564.19	564.49	564.32	563.73	563.51	564.37	563.12	565.31
07/02/2014	558.88	559.53	559.53	559.63	559.45	581.94★	599.76★	604.13★	603.20★	560.27
14/03/2014	557.74	557.60	557.72	557.79	557.71	557.90	556.28	557.91	557.01	558.51

★: outliers that have been remove in calculating the average altitude.

Since there is only one *in situ* value per date and ten different satellite values, the mean value was calculated for the latter and was used as the final water level data in the analysis.

The first three cycles of SARAL presented problems of acquisition are usually reflected in very poor precision. Those cycles (March - May 2013) were not used. A few other measurements (three) were clearly outliers and were also eliminated from the calculations 5.

When comparing the satellite water levels to the *in situ* gauge data, a systematic shift of $\approx +1.33$ was observed and was later substracted from the satellite altimetry data (column four in Table 5). We were able to attribute most of this difference to four different factors that have been reported in other studies (factor 1 and 2) or to a difference between the vertical datum used by CEMIG.

1. The ellipsoid used by Envisat and SARAL has a 70 cm difference with the official GRS80 (Stphane Calmant, personal communication).
2. The Ice1 retracker (used in this study) has been reported to show a bias of 60 to 85 cm.³⁶
3. A difference of about 10 cm has been shown between the EGM96 datum used by Envisat and SARAL and the Imituba datum used by CEMIG.³⁷
4. Other sources of errors in the correction process.

After substracting the systematic difference from the satellite data, we obtained a root mean square error of 0.24 m. Considering that the satellite and *in situ* measurements were not taken simultaneously the error is as good or better than reported in other similar studies.^{3, 12, 18, 38}

4.3 Level, Area and Volume Change Relations

Once all the values for the SWG mean level, *in situ* level and reservoir area were established, a regression curve was calculated for the relations between those variables (SWG *vs* Area and *In situ vs* Area). The data was plotted on a graph (Figure 5) showing the linear tendency between the level measurements and the area. The equations for both lines present a very close slope coefficients and the constant coefficients had a difference of 1.30 m, matches the 1.33 m error difference between the absolute values of SWG and *in situ* levels, as shown in the following equations (Eq. 2 and 3).

$$Area = 544,43 + 0,294(level_{in\,situ}) \quad (2)$$

$$Area = 543,13 + 0,293(level_{SWG}) \quad (3)$$

Table 5. Altimetry results (SWGTOOLS), reference data (CEMIG) and areas of the reservoir calculated from the Landsat images.

Gauging date	<i>In situ</i> gauge (CEMIG)	SWG gauge satellites	SWG gauge corrected	Squared difference	Image date	± days diff.★	Area
28/06/2007	570.55	571.41	570.08	0.219	29/06/2007	+1	934,00
02/08/2007	569.66	570.73	569.41	0.065	31/07/2007	-2	902,70
17/07/2008	571.39	572.84	571.51	0.015	17/07/2008	0	964,57
21/08/2008	570.43	571.73	570.41	0.001	18/08/2008	-3	927,39
03/07/2009	571.97	573.50	572.17	0.041	04/07/2009	+1	980,59
27/08/2010	564.78	566.37	565.04	0.068	24/08/2010	-3	723,53
13/07/2013	562.92	564.10	562.77	0.021	15/07/2013	+2	646,92
07/02/2014	557.91	559.55	558.22	0.098	08/02/2014	+1	500,86
14/03/2014	556.29	557.62	556.29	0.000	12/03/2014	-2	481,81

★ Difference of dates between the satellite altimetry and the satellite image.

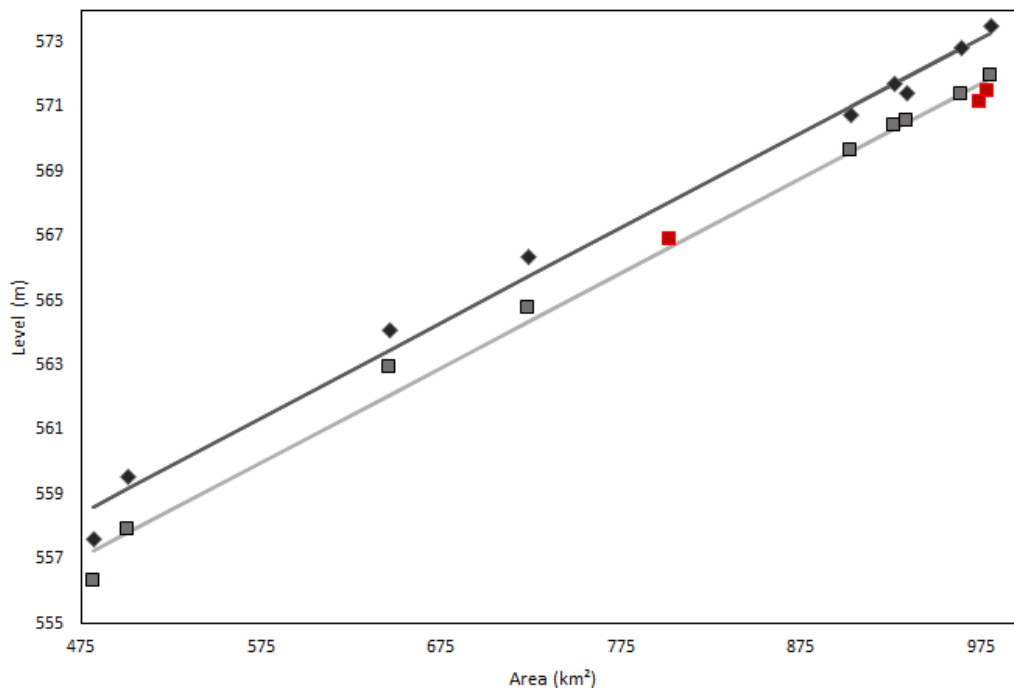


Figure 5. Relation between area and water levels. The gray line represents the linear regression for the *in situ* levels and the darker line for the SWG levels. The red squares represent *in situ* measurements without satellite altimetry correspondence.

The combination of the SWG levels and surface area, as well as *in situ* level and surface area, was used to estimate the volume variation in the reservoir between the selected dates. The change in volume (ΔV) between two dates d_1 and d_2 was calculated using equation 4, where $\Delta level = level(d_1) - level(d_2)$.

$$\Delta V = \Delta level \times (Area(d_1) + Area(d_2))/2 \quad (4)$$

The linear regression was also established for the volume variation using equations 5 and 6. That show a almost identical behaviour in the volume from both SWG and *in situ* (Figure 6).

$$Volume_{in\,situ} = -0,0003 + 0,000776(\Delta volume_{in\,situ}) \tag{5}$$

$$Volume_{SWG} = -0,00032 + 0,00076(\Delta volume_{SWG}) \tag{6}$$

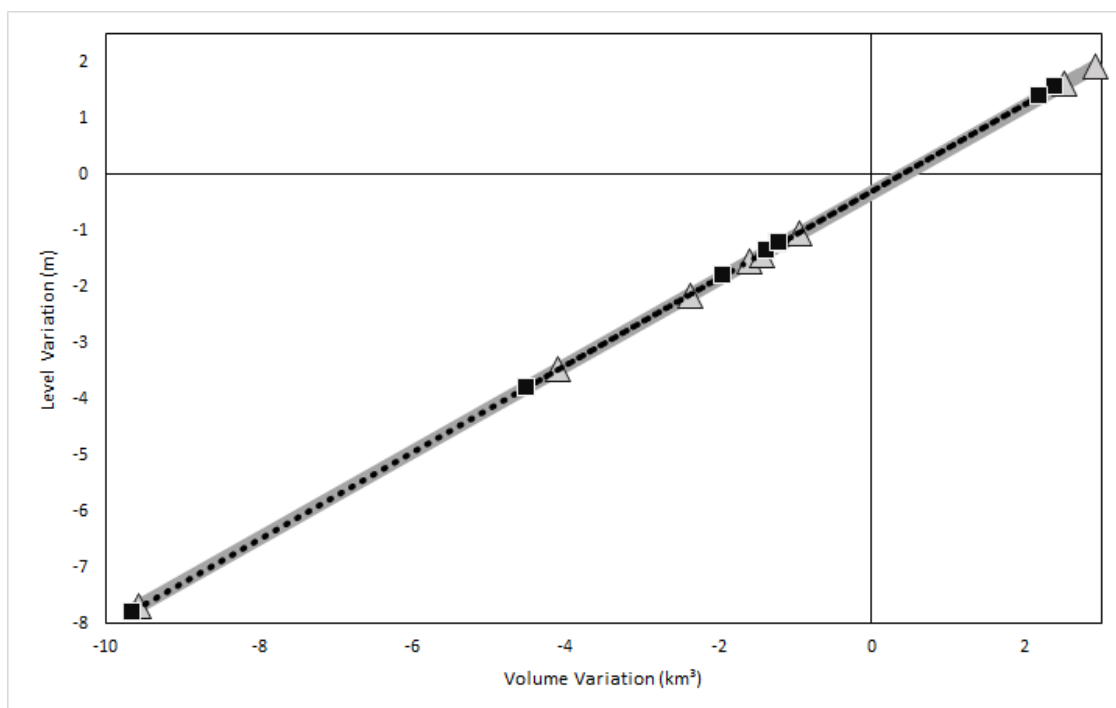


Figure 6. Relation between volume and water level variations. The black line represents the linear regression for the *in situ* level and the gray line for the SWG level. The squares represent *in situ* variations and the triangles the SWG variations.

The volume variations found are shown in table 6. The RMSE calculated for the SWG volume variation was of 0.37km^3 .

Table 6. Três Marias Reservoir volume variations in cubic kilometres

Date Station	SWG Volume	<i>In situ</i> Volume	Squared difference
29/06 to 31/07/2007	-0.94	-1.23	0.15
31/07/2007 to 17/07/2008	2.92	2.40	0.38
17/07 to 18/08/2008	-1.59	-1.37	0.01
18/08/2008 to 04/07/2009	2.51	2.18	0.18
04/07/2009 to 24/08/2010	-9.57	-9,65	0.03
24/08/2010 to 15/07/2013	-2.37	-1.95	0.11
15/07/2013 to 08/02/2014	-4.09	-4.50	0.26
08/02/2014 to 12/03/2014	-1.43	-1.20	0.02

The variation from the lowest level to the highest level yielded a total of 11.48 km³ and 11.62 km³, for *in situ* and SWG levels, respectively. The Três Marias reservoir has attained its lowest level since it was first filled ($\approx 8\%$) has can be observed on Figure 7.

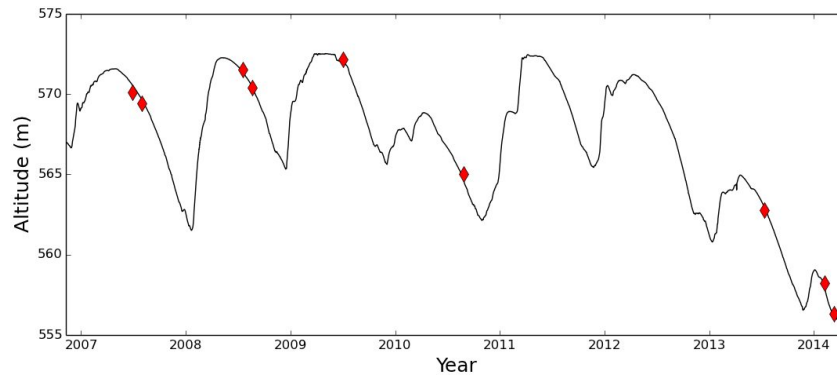


Figure 7. Time series of the level of Três Marias reservoir between 2007 and 2014 according to CEMIG *in situ* data. Red diamonds show the water levels calculated form Envisat and SARAL for witch a corresponding Landsat image was available.

5. CONCLUSION

These results can be used to monitor and manage the water resources of the Três Marias reservoir, that is an important regulator to the downstream regions of the São Francisco river. Due to the dendritic pattern of the reservoir's shape its perimeter is much larger in relation to its area so that the relation between the area and the water levels is linear. Even a small change in level can result in large surface area and volume changes. A RMSE of 0.24 m was achieved between the *in situ* data and satellite-based water levels and was considered good given the footprint size of the Envisat and SARAL satellites.

With further corrections of the altimetry retracers and embedded errors the relation between the water levels can improve significantly. As the SARAL mission continues to produce more data with its latest cycles, the number of matching dates for satellite imagery also increases, allowing the definition of a level *vs* area and level *vs* volume curve based solely on remotely sensed data.

Using satellite altimetry data in a global reference makes the comparison with other reservoirs and lakes worldwide much easier and can be used to establish and feed a database for future research, supplying access to water level data for the general public. The next five years should bring up to five new satellites with altimeters that will increase significantly the return frequency and make satellite altimetry more operational for monitoring lakes and reservoirs.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was made possible with the cooperation of Companhia Energtica de Minas Gerais - CEMIG. That kindly provided the *in situ* data used.

REFERENCES

- [1] ANA, "Agência nacional de águas," (June 2014).
- [2] Ministério do Meio Ambiente, [*Caderno da região Hidrográfica do São Francisco*], Brasília: MMA, SRH.
- [3] Maillard, P. and Calmant, S., "Spatial processing techniques for satellite altimetry applications in continental hydrology," in [*Proceedings of SPIE Remote Sensing 2013*], **8887**, International Society for Optics and Photonics, Dresden, Germany (2013).

- [4] Ričko, M., Birkett, C. M., Carton, J. A., and Crétaux, J.-F., “Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry,” *Journal of Applied Remote Sensing* **6**(1), 061710–061710 (2012).
- [5] Berry, P., “Two decades of inland water monitoring using satellite radar altimetry,” in [*Proceedings of the*], **15** (2006).
- [6] Koblinsky, C., Clarke, R., Brenner, A., and Frey, H., “Measurements of river level variations with satellite altimetry,” *Water Resources Research* **29**(6), 1839–1848 (1993).
- [7] Birkett, C., “The global remote sensing of lakes, wetlands and rivers for hydrological and climate research,” in [*Proceedings of IEEE IGARSS Conference*], (1995).
- [8] Birkett, C., “Contribution of the Topex NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands,” *Water Resources Research* **34**(5), 1223–1239 (1998).
- [9] Ponchaut, F. and Cazenave, A., “Continental lake level variations from TOPEX/Poseidon (1993-1996),” *Comptes Rendus de l’Academie des Sciences* **326**(1), 13–20 (1998).
- [10] Crétaux, J.-F. and Birkett, C., “Lake studies from satellite radar altimetry,” *Comptes Rendus Geoscience* **338**(14), 1098–1112 (2006).
- [11] Crétaux, J.-F., Jelinski, W., Calmant, S., Kouraev, A., Vuglinski, V., Bergé-Nguyen, M., Gennero, M.-C., Nino, F., Abarca Del Rio, R., Cazenave, A., et al., “Sols: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data,” *Advances in Space Research* **47**(9), 1497–1507 (2011).
- [12] Calmant, S. and Seyler, F., “Continental surface waters from satellite altimetry,” *C.R. Geoscience* **338**, 1113–1122 (2006).
- [13] Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé, M., Seyler, F., and Cazenave, A., “Preliminary results of envisat ra-2-derived water levels validation over the amazon basin,” *Remote Sensing of Environment* **100**(2), 252–264 (2006).
- [14] Frappart, F., Papa, F., Güntner, A., Werth, S., Santos da Silva, J., Tomasella, J., Seyler, F., Prigent, C., Rossow, W. B., Calmant, S., et al., “Satellite-based estimates of groundwater storage variations in large drainage basins with extensive floodplains,” *Remote Sensing of Environment* **115**(6), 1588–1594 (2011).
- [15] Duan, Z. and Bastiaansen, W., “Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data,” *Remote Sensing of Environment* **134**, 403–416 (2013).
- [16] S.L.Brito, “Caracterização limnológica e produtividade secundária das principais espécies de microcrustáceos em dois braços dos reservatórios de três marias e furnas, minas gerais, brasil,” *Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 107p (2010).
- [17] CEMIG, “Companhia energética de minas gerais - cemig,” (May 2014).
- [18] Da Silva, J. S., Seyler, F., Calmant, S., Rotunno Filho, O. C., Roux, E., Araújo, A. A. M., and Guyot, J. L., “Water level dynamics of amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry,” *International Journal of Remote Sensing* **33**(11), 3323–3353 (2012).
- [19] CTOH, “Center for topographic studies of the ocean and hydrosphere,” (May 2014).
- [20] AVISO, “Aviso+ - satellite altimetry data,” (May 2014).
- [21] ESA, “European space agency,” (May 2014).
- [22] Gardini, B., Graf, G., and Ratier, G., “The instruments on envisat,” *Acta Astronautica* **37**, 301–311 (1995).
- [23] CNES, “Centre national d’études spatiales - saral/altika,” (May 2014).
- [24] ISRO, “Indian space reaserch organization,” (May 2014).
- [25] Richard, J., Durand, B., Robert, F., Taveneau, N., Stenou, N., and Sengenés, P., “Altika instrument for space altimetry with improved performances and ocean sampling: Development status and first test results,” in [*Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*], **3**, III–67, IEEE (2008).
- [26] Maillard, P., Bercher, N., and Calmant, S., “Approaches in processing satellite altimetry data for applications in fluvial hydrology: case study on the São Francisco River in Brazil,” *Remote Sensing of Environment* (in preparation).
- [27] Richter, R. and Schlpfer, D., “Atcor-2/3 user guide (ver. 8.3.1),” *ReSe Applications Schlpfer* (2014).

- [28] Silva, G. e. a., “Procedimentos para correio geométrica de imagens de satélite,” *Circular Técnica Embrapa* **18**, 1–18 (2012).
- [29] Facility, G. L. C., “Global land cover facility,”
- [30] Nurlidiasari, M., “The application of quickbird and multi-temporal landsat tm data’for coral reef habitat mapping case study: Derawan island, east kalimantan, indonesia,” *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands* (2004).
- [31] Documentation, T., “eCognition® developer 8.64. 0 reference book,” (2010).
- [32] Jain, S. K., Singh, R. D., Jain, M. K., and Lohani, A. K., “Delineation of flood-prone areas using remote sensing technique,” *Water Resources Management* **19**(4), 337–347 (2005).
- [33] Maillard, P., Pivari, M., and Pires-Luiz, C., [*Remote Sensing of Planet Earth*], ch. Remote sensing for mapping and monitoring wetlands and small lakes in Southeast Brazil, 21–44, InTech - Open Access Publisher, Rijeka, Croatia (2012).
- [34] ESRI, “Arcgis 10.,” (2006).
- [35] Ji, L., Zhang, L., and Wylie, B., “Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index,” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **75**(11), 1307–1317 (2009).
- [36] Crétaux, J.-F., Calmant, S., Romanovski, V., Shabunin, A., Lyard, F., Bergé-Nguyen, M., Cazenave, A., Hernandez, F., and Perosanz, F., “An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake issykkul in central asia,” *Journal of Geodesy* **83**(8), 723–735 (2009).
- [37] Luz, R. T., “Acompanhamento do datum altimétrico IMBITUBA através das redes altimétrica e maregráfica do sistema geodésico brasileiro,” in [*VII Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra*], 1–8, Instituto Geografico Militar de Chile (2002).
- [38] da Silva, J., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O., Cochonneau, G., and Mansur, W., “Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions,” *Remote Sensing of Environment* **114**, 2160–2181 (2010).