



**PUC Minas**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA TRATAMENTO DA  
INFORMAÇÃO ESPACIAL

CAROLINA CRAMER ALMEIDA MARQUES MOURA

**AEROGEOFÍSICA E GAMAESPECTROMETRIA APLICADAS AO  
MAPEAMENTO REGIONAL DAS ZONAS DE RECARGA DOS AQUÍFEROS  
DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE/MINAS GERAIS**

Belo Horizonte

2019

**CAROLINA CRAMER ALMEIDA MARQUES MOURA**

**AEROGEOFÍSICA E GAMAESPECTROMETRIA APLICADAS AO  
MAPEAMENTO REGIONAL DAS ZONAS DE RECARGA DOS AQUÍFEROS  
DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE/MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Pontifícia  
Universidade Católica de Minas  
Gerais, como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Geografia – Tratamento da  
Informação Espacial, para obtenção do  
título de Mestre em Geografia.

Orientador: Sandro Laudares

Coorientador: João Henrique Rettore  
Totaro

Belo Horizonte

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

M929a Moura, Carolina Cramer Almeida Marques  
Aerogeofísica e gamaespectrometria aplicadas ao mapeamento regional das zonas de recarga dos aquíferos da região metropolitana de Belo Horizonte/Minas Gerais / Carolina Cramer Almeida Marques Moura. Belo Horizonte, 2019.  
119 f. : il.

Orientador: Sandro Laudares  
Coorientador: João Henrique Rettore Totaro  
Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial

1. Aquíferos - Belo Horizonte, Região Metropolitana de (MG). 2. Águas subterrâneas - Belo Horizonte, Região Metropolitana de (MG). 3. Recursos hídricos. 4. Sensoriamento remoto - Belo Horizonte, Região Metropolitana de (MG) 5. Geomorfologia. 6. Análise espacial (Estatística). 7. Sistemas de informação geográfica. 8. Hidrogeologia. I. Laudares, Sandro. II. Totaro, João Henrique Rettore. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial. IV. Título.

CDU: 556.33(815.11)

**CAROLINA CRAMER ALMEIDA MARQUES MOURA**

**AEROGEOFÍSICA E GAMAESPECTROMETRIA APLICADAS AO  
MAPEAMENTO REGIONAL DAS ZONAS DE RECARGA DOS AQUÍFEROS  
DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE/MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial, para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Henrique Paprocki  
PUC-Minas

---

Prof. Dr. Marcelo Antônio Nero  
UFMG

---

Prof. Dr. Sandro Laudares  
PUC-Minas (Orientador)

---

Prof. Dr. João Henrique Rettore Totaro  
PUC-Minas (Co-orientador)

Belo Horizonte, 26 de setembro de 2019.

*“Mas os pastores de Gerar contenderam com os pastores de Isaque, dizendo: Esta água é nossa. Por isso, chamou o poço de Esequê, porque contenderam com ele.”*

*Manuscritos bíblicos, entre os séculos  
XVIII e XXI a.C.*

## AGRADECIMENTOS

Ao único que é digno de toda honra e toda glória: Jesus. Sem Ele na minha vida, até me seria lícito essa conquista, mas nunca me seria edificante.

Ao meu marido Túlio Henrique, que sonhou junto comigo, sempre presente com todo carinho e amor.

Agradeço aos meus pais, Arilza e Evandro, por me apoiarem em quaisquer circunstância nessa longa caminhada. Agradeço também ao meu irmão Caio Cramer e minha cunhada Bárbara, por sempre me apoiarem em tudo.

A amiga Lívia que nunca me deixou na mão e se tornou uma irmã pra mim. Também a Suellen, em quem em pouco tempo pude confiar todos os meus anseios, perspectivas, sonhos e tristezas. E ao Rafael por toda a força e incentivo sempre. Muito obrigada!

Ao meu professor orientador Sandro Laudares e ao meu coorientador João Rettore, que se mostraram totalmente abertos e disponíveis em ajudar no que for preciso. Grandes mestres!

Agradeço ao programa Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial (PPGG – TIE) que me proporcionou essa experiência tão construtiva para minha carreira acadêmica juntamente com o apoio da FAPEMIG.

## RESUMO

A região metropolitana de Belo Horizonte – RMBH – é formada por 34 municípios em uma área equivalente a 9.473 km<sup>2</sup> no Estado de Minas Gerais, caracterizada por uma conurbação majoritariamente desordenada a qual acarreta processos invasivos ao meio ambiente. O principal processo tratado neste estudo é a exploração das águas subterrâneas para diversos usos antrópicos. No entanto, a exploração caótica interfere diretamente na sinergia cíclica da água, nas quais, por meio da natureza geológica dos aquíferos, necessitam constantemente serem recarregadas. Definindo por objetivo geral o sugestionamento da delimitação das zonas preferenciais de recarga dos aquíferos da RMBH/MG. Dessa forma, os estudos das zonas preferenciais de recarga dos aquíferos foram realizados por meio de mapeamentos aerogeofísicos e gamaespectrométricos, aliados à análise da perfilagem da RMBH, com foco no potencial produtivo dos poços outorgados. Foram feitas as extrações dos lineamentos por meio dos dados de sensoriamento remoto através do tratamento das imagens de satélite concomitante ao uso de alguns *softwares* e feita a elaboração dos mapas de lineamento, perfilagem, densidade de lineamentos, morfoestrutural, de elementos radiométricos e ternários. O trabalho apontou importantes considerações sobre as zonas preferenciais de recarga dos aquíferos, revelando a importância da preservação e conservação em meio a exploração dos recursos hídricos. Nas análises integradas dos dados gamaespectrométricos representados pelos mapas ternários (RGB) e as variáveis de pedologia, geomorfologia e geologia foram constatados uma forte correlação entre o ternário e pedologia diante do potencial hídrico de perfilagem. Nessa perspectiva é possível afirmar que os aquíferos compõem essencialmente o ciclo hidrológico da água e exibem um aspecto ambiental preocupante frente à conurbação urbana.

**Palavras-chave:** Aquífero, aerogeofísico, poços, gamaespectrométrico, águas subterrâneas.

### **ABSTRACT**

The metropolitan region of Belo Horizonte - RMBH - is made up of 34 municipalities in an area equivalent to 9,473 km<sup>2</sup> in the state of Minas Gerais, characterized by a mostly disordered conurbation which causes invasive processes to the environment. The main process addressed in this study is the exploitation of groundwater for various anthropic uses. However, chaotic exploitation interferes directly with the cyclical synergy of water, where, through the geological nature of aquifers, they constantly need to be recharged. Defining by general objective the suggestion of the delimitation of preferential recharge zones of the aquifers of RMBH / MG. Thus, the studies of the preferential recharge zones of the aquifers were carried out by means of aerogeophysical and gamma-spectrometric mappings, allied to the RMBH profiling analysis, focusing on the productive potential of the granted wells. Linear extractions were performed through remote sensing data through the treatment of satellite images concomitantly with the use of some software and the elaboration of the lineament, profiling, linear density, morphostructural, radiometric and ternary elements maps. The work pointed important considerations about the preferential recharge zones of aquifers, revealing the importance of the preservation and conservation amid the exploitation of water resources. In the integrated analyzes of the gamma-spectrometric data represented by the ternary maps (RGB) and the pedology, geomorphology and geology variables, a strong correlation between the ternary and pedology was found in relation to the water potential of profiling. From this perspective we can say that aquifers essentially make up the hydrological cycle of water and exhibit a worrying environmental aspect in the face of urban conurbation

**Keywords:** Aquifer, aerogeophysical, wells, range-spectrophotometric, groundwater.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição da água no subsolo .....	22
Figura 2.2 – Zonas de umidade da distribuição vertical da água no solo e subsolo.....	23
Figura 2.3 – Quantitativos de potencial explotável das regiões hidrográficas brasileiras.....	28
Figura 2.4 – Tipos de aquíferos conforme a porosidade .....	30
Figura 2.5 – Área de recarga e descarga do sistema aquífero .....	37
Figura 2.6 – Modelos de recarga artificial em aquíferos.....	38
Figura 2.7 – Elementos do aquífero fissural.....	42
Figura 2.8 – Perfil esquemático de poços tubulares profundos em rochas sedimentares e cristalinas.....	45
Figura 2.9 – Interconexão de fraturas em poços com vazões distintas.....	46
Figura 2.10 Abundância relativa de elementos radioativos nas rochas.....	50
Figura 3.1 – Mapa dos municípios da região metropolitana de Belo Horizonte .....	54
Figura 3.2 – Índice pluviométrico na RMBH (2014 – 2016) .....	55
Figura 3.3 – Mapa Hipsométrico RMBH .....	57
Figura 3.4 – Mapa da compartimentação geomorfológica da RMBH .....	59
Figura 3.5 – Mapa pedológico da RMBH .....	61
Figura 3.6 – Mapa geológico da RMBH .....	65
Figura 3.7 – Mapa hidrogeologia da RMBH.....	67
Figura 3.8 – Mapa dos poços da RMBH .....	69
Figura 3.9 – Mapa da vazão média dos poços da RMBH .....	70
Figura 3.10 – Mapa dos aquíferos da RMBH.....	72
Figura 3.11 – Sistema de abastecimento da RMBH.....	75
Figura 4.1 – Fluxograma metodológico .....	77
Figura 5.1 – Mapa de contagens dos elementos radiométricos .....	86
Figura 5.2 – Mapas ternários do RGB e CYM da RMBH .....	88
Figura 5.3 – Mapa dos poços e lineamentos da RMBH sob a imagem LANDSAT8 .....	91
Figura 5.4 – Mapa de densidade de lineamentos da RMBH .....	93
Figura 5.5 – Diagramas de rosetas de frequência por orientação e comprimento dos lineamentos da RMBH.....	94
Figura 5.6 – Mapa da distribuição ternária dos radioelementos com padrão RGB mostrando a influência dos poços tubulares e da pedologia .....	98
Figura 5.7 – Mapa da distribuição ternária dos radioelementos com padrão RGB mostrando um recorte na região sudeste da RMBH com influências pedológicas .....	100

Figura 5.8 – Mapa da distribuição ternária dos radioelementos com padrão RGB com influências geomorfológicas.....	102
Figura 5.9 – Recorte à sudeste da RMBBH do mapa da distribuição ternária dos radioelementos mostrando a influência da topografia e da drenagem na distribuição dos mesmos.....	104
Figura 5.10 – Mapa de contagem dos elementos radiométricos com a sobreposição dos lineamentos.....	108

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 2.1 – Posição da geografia humano-ambiental dentro da disciplina da geografia. ....	19
Quadro 2.2 – Classificação dos métodos geofísicos .....	36
Quadro 2.3 – Fatores que influenciam na água subterrânea em rochas cristalinas .....	42
Quadro 2.4 – Modelos de ocorrência de água subterrânea em terrenos cristalinos.....	44
Quadro 2.5 – Principais características dos elementos radiométricos (K,U e Th) .....	49
Quadro 3.1 – Fluxograma das principais características dos aquíferos.....	52
Quadro 3.2 – Coluna litoestratigráfica regional .....	63

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Reservas de águas subterrâneas do Brasil .....	27
Tabela 2.2 – Disponibilidade de águas subterrâneas nos principais sistemas aquíferos do país. .....	40
Tabela 3.1 – Unidades hidrogeológicas da RMBH .....	68

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

ACP – Análise do Componente Principal

ANA – Agência Nacional das Águas

BH – Belo Horizonte

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

MG – Minas Gerais

NASA – National Aeronautics and Space Administration

PCD – Plataforma de coleta de dados

pH – Potencial Hidrogeniônico

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PUC MINAS – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

SR – Sensoriamento Remoto

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SNGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

USGS – Serviço Geológico Norte-Americano

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E METODOLÓGICOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Pensamento Sistêmico.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Abordagem geral dos recursos hídricos com ênfase em águas subterrâneas .....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Importância da água subterrânea no ciclo hidrológico.....	20
2.2.2 A gestão das águas subterrâneas.....	24
<b>2.3 Aquíferos .....</b>	<b>29</b>
2.3.1 Geoquímica de Aquíferos Cristalinos.....	31
2.3.2 Hidrodinâmica e Caracterização Geofísica dos Aquíferos.....	34
2.3.3 Recarga de Aquíferos.....	37
2.3.4 Hidrogeologia dos Meios Fissurados .....	41
2.3.5 Exploração das águas subterrâneas – Poços.....	45
<b>2.4 Sensoriamento Remoto: Aerogeofísica e Gamaespectrometria.....</b>	<b>47</b>
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1 Localização .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2 Aspectos fisiográficos .....</b>	<b>55</b>
<b>3.3 Geologia Regional.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4 Hidrogeologia .....</b>	<b>66</b>
3.4.1 Características dos Aquíferos.....	70
<b>3.5 Captação de água para abastecimento público .....</b>	<b>74</b>
<b>4. ABORDAGEM METODOLÓGICA.....</b>	<b>76</b>
<b>4.1 Considerações gerais .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2 Levantamento de dados e de poços da região – Perfilagem RMBH.....</b>	<b>77</b>
<b>4.3 Tratamento dos dados disponíveis – Sensoriamento Remoto.....</b>	<b>79</b>
<b>4.4 Tratamentos geoestatísticos.....</b>	<b>81</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1 Análise gamaespectrométrica .....</b>	<b>84</b>
<b>5.2 Análise de Resultados a partir do Sensoriamento remoto.....</b>	<b>90</b>
<b>5.3 Geoestatística.....</b>	<b>94</b>
<b>5.4 Interação geológica-geofísica .....</b>	<b>96</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>110</b>