



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

***A DECISÃO ECONÔMICA NA EXPLORAÇÃO MINERAL:
UMA ABORDAGEM DE SISTEMAS MINERAIS E SUA
APLICAÇÃO AOS DEPÓSITOS AURÍFEROS DO GREENSTONE
BELT RIO DAS VELHAS***

Juliane Cristina Ferreira Uchôa

TESE DE DOUTORADO
PROGRAMA EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

Brasília, abril de 2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

***A DECISÃO ECONÔMICA NA EXPLORAÇÃO MINERAL:
UMA ABORDAGEM DE SISTEMAS MINERAIS E SUA
APLICAÇÃO AOS DEPÓSITOS AURÍFEROS DO GREENSTONE
BELT RIO DAS VELHAS***

Juliane Cristina Ferreira Uchôa

Tese de doutorado apresentada junto ao curso de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica – Área de concentração Geofísica Aplicada, para obtenção do título de doutora.

Orientadora: Prof^a Dr^a. Catarina L.B. Toledo

Co-orientadora: Prof^a Dr^a. Adalene Moreira Silva

Co-orientador: Dr. Augusto Mendonça

Orientador SWE: Prof. Dr. Steffen Hagemann - CET/UWA, Austrália

Co-Orientador: Dr. Oliver Kreuzer - School of Earth & Environmental Science, James Cook University



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

Brasília, abril de 2018

***A DECISÃO ECONÔMICA NA EXPLORAÇÃO MINERAL:
UMA ABORDAGEM DE SISTEMAS MINERAIS E SUA
APLICAÇÃO AOS DEPÓSITOS AURÍFEROS DO GREENSTONE
BELT RIO DAS VELHAS***

Juliane Cristina Ferreira Uchôa

Tese de doutorado apresentada junto ao curso de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica – Área de concentração Geofísica Aplicada, para obtenção do título de doutora.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª. Catarina L.B. Toledo

Co-orientadora: Prof^ª Dr^ª. Adalene Moreira Silva

Co-orientador: Dr. Augusto Mendonça

Orientador SWE: Prof. Dr. Steffen Hagemann - CETT/UWA, Austrália

Co-Orientador: Dr. Oliver Kreuzer - School of Earth & Environmental Science, James Cook University

Brasília, abril de 2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

***A DECISÃO ECONÔMICA NA EXPLORAÇÃO MINERAL:
UMA ABORDAGEM DE SISTEMAS MINERAIS E SUA
APLICAÇÃO AOS DEPÓSITOS AURÍFEROS DO GREENSTONE
BELT RIO DAS VELHAS***

Juliane Cristina Ferreira Uchôa

**TESE DE DOUTORADO
PROGRAMA EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA**

Orientadora: Prof^a Dr^a. Catarina L.B. Toledo

Co-orientadora: Prof^a Dr^a. Adalene Moreira Silva

Co-orientador: Dr. Augusto Mendonça

Comissão Examinadora:

Prof^a Dr^a. Catarina L.B. Toledo (PRESIDENTE) (IG/UNB)

Prof. Dr. Augusto César Bittencourt Pires (IG/UNB)

Prof^a. Dr^a. Silvia Beatriz Alves Rolim (URGS)

Prof. Dr. Alexandre de Amorim Teixeira (ANA)



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

À Faustina Ferreira Costa (*in memoriam*)

RESUMO

Um dos desafios na exploração mineral é o desenvolvimento de um método que reflita tanto os critérios geológicos pontuados em modelos metalogenéticos quanto as estratégias para seleção de alvos exploratórios. Uma nova abordagem denominada de Sistemas Mineraiis, vastamente conhecida tanto na indústria mineral quanto em meios acadêmicos, conceitua que depósito é uma parte de um sistema mineralizante maior e que sua expressão pode ser estudada em diferentes escalas. Em uma escala litosférica, um sistema mineral é descrito por três elementos: fertilidade, arquitetura favorável e período geodinâmico. Da escala regional à de depósito, desmembra-se em quatro componentes: fonte, migração (*pathyway*), trapas e dispersão geoquímica. Essa abordagem foi testada no Quadrilátero Ferrífero, porção Sul do Cráton São Francisco, com foco central nos depósitos auríferos orogênicos arqueanos hospedados em terrenos do tipo *greenstone belt*. A província compreende depósitos auríferos de classe mundial, tais como, Morro Velho e Cuiabá. O método proposto neste trabalho compreende uma análise em três diferentes escalas: Província (1:500.000), Distrito (1:100.000) e Blocos (1:50.000), cujo foco é a descrição do Sistema Mineral Rio das Velhas (SMRV) com base na interpretação de dados multi-fontes (geológicos, geofísicos e geoquímicos) para depósitos hospedados em rochas metavulcânicas máficas/ultramáficas e formações ferríferas bandadas. O primeiro modelo define o *endowment* aurífero, o qual indica a parte central do GBRV como área de maior prospectividade mineral. O modelo em escala intermediária destaca os diferentes distritos auríferos. O modelo final, em escala de semi-detalle (Bloco), aponta os alvos exploratórios. Os resultados obtidos nestas modelagens são coerentes pois mapeiam minas, ocorrências e garimpos conhecidos para todos os cenários. Novas áreas potenciais foram identificadas e sinalizam áreas em estágio de exploração iniciais e avançadas. Essas áreas foram novamente classificadas em 3A, 3B e 3C e representam diferentes intervalos de favorabilidade, levando-se em consideração também, a atuação exploratória na região do Quadrilátero Ferrífero. A partir da integração de dados históricos de 15 depósitos, foram estimadas curvas de teor e tonelagem utilizando-se a simulação de Monte Carlo. O resultado é apresentado para toda área do modelo em escala de blocos, como também para os distritos. Uma avaliação econômica foi elaborada para um prospecto hipotético, onde simulou-se os três cenários previamente denominados de 3A, 3B e 3C. Para cada alternativa foi atribuída uma probabilidade *a priori*, de forma a facilitar o cálculo do valor esperado.

Os cenários do tipo 3A e 3B foram os mais vantajosos e competitivos. Observa-se que por se tratarem de áreas potenciais inseridas em contexto já provado, ou seja, inclui depósitos em fase de exploração atual ou histórica, oferecem uma menor incerteza geológica e risco exploratório.

ABSTRACT

One of the main challenges in mineral exploration is to develop a method that reflects geological criteria and strategies for area selection, both, based on metallogenetic models. A new approach entitled mineral system, broadly known in the mineral industry and academia, defines that deposits is a part of a larger system and the expression of mineralization footprint very conforming the study scale. A system can be understood or describe by three significant elements in lithospheric scale, such as fertility, favourable architecture and geodynamic period. From regional to deposit scale, the components are named as source, migration (pathway), traps and geochemical dispersion. This approach was tested in Quadrilátero Ferrífero, southwest of São Francisco Craton, focussing on orogenic gold deposits hosted on Archean greenstone belt. The province comprehends world-class deposits such as Morro Velho and Cuiabá. In this work propose, three scales that will be investigated: Province (1:500.000), District (1:100.000) and camp-scale (1:50.000). The main goal is to define the Rio das Velhas Mineral System, based upon data integration (geology, geophysics, and geochemistry) targeting gold deposits hosted in mafic, ultramafic and iron ore banded formation. The first model presents the gold endowment for orogenic deposits, highlighting the central portion of Rio das Velhas Greenstone Belt as the most favourable area for this geological process. The model in intermediate scale pointed out the different gold districts. The final model, at the semi-detailed scale, selects the potential areas and exploratory targets. The modeling results are coherent, once they mapped current and past mines and gold mineralizations. New potential areas were identified, flagging those already studied in mineral exploration activities. These areas were ranked and classified as 3A, 3B, and 3C, where that represents different favourability stages, also taking into account the current mineral exploration activity. After the modeling phase, 15 historical data from the most relevant gold deposits were integrated in order to calculate a tonnage and grade model using Monte Carlo Simulation. The results were presented for the whole area of camp-scale map, also for the individual districts (Nova Lima, Cuiabá-Lamego Complex and lineaments Córrego do Sítio and São Vicente). An economic evaluation was praised for a hypothetical prospect, where those potential areas type (3A, 3B and 3C) were simulated as three possible scenarios. Each alternative was calculated using an a priori probability, resulting in expected value considering the exploration risk. The most competitive

results were presented by 3A and 3B scenarios. They are located in areas of intense mineral exploration activity (past or recent) and offers the lowest geological uncertainty and low levels of exploratory risk.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar sou grata à minha história, onde as páginas principais dessa biografia devo à memória de minha Mãe, Faustina Ferreira Costa. Uma mulher forte e que sempre me guiou nos desafios enfrentados. Ela sempre me apoiou, principalmente em momentos em que poderia desistir sob os efeitos dos “nãos” da vida. Agradeço também, a todas mulheres que fortaleceram minha visão de mundo, como minhas irmãs, amigas e chefes. Sim, podemos e não, não somos um sexo frágil!

Agradeço à Mãe Terra, seus episódios, sua evolução e a seus recursos que nos fornecem provas inequívocas da grandeza desse planeta. Um bem mineral conecta milhões, bilhões de anos de eventos geológicos, transmutados no presente pelo homem em alimento, vestes e em tecnologias que nos parametriza para o futuro. Agradeço meus anos no setor mineral e ao entendimento de que os recursos minerais devem ser consumidos sob os pilares da sustentabilidade e harmonia. Embora essa tese não aborde isso, espero que as técnicas e discussões aqui tratadas, para os estágios iniciais de pesquisa mineral, auxiliem decisões com esse preceito.

Agradeço a oportunidade de abordar diversas áreas do conhecimento. Isso não seria possível sem a ajuda dos meus orientadores. Agradeço a Profa Catarina por toda sua ajuda, ensinamentos e amizade. À Profa Adalene por ter me recebido, mais uma vez, e ter permitido o desenvolvimento de um projeto de doutorado com tantas abordagens. Sou também muito grata ao meu orientador Dr. Augusto, por me guiar nesse mundo de decisões analíticas e principalmente, por partilhar seu conhecimento.

Agradeço Adalene, Catarina e Augusto Mendonça, não apenas por terem sido meus professores nesta jornada, mas também, por terem me orientado nos desafios pessoais que encontrei ao longo dela.

Agradeço à Prof^a Adriana, por sua participação nessa tese, por partilhar seu conhecimento e principalmente pela amizade e companheirismo. Ao Darby, por toda sua ajuda e apoio. Com carinho, reconheço toda a atenção em nossas discussões e aos cafezinhos, dos quais sentirei uma imensa saudade.

Agradeço aos meus orientadores no exterior. Ao Prof. Steffen Hagemann por ter me recebido durante o meu período de estágio, o meu obrigada pelas discussões e

contribuições. Ao Dr. Oliver Kreuzer, por ter aceitado ser um colaborador e ter me guiado em várias discussões nos artigos apresentados nessa tese.

Agradeço à CAPES pela bolsa concedida durante os anos de doutorado.

Agradeço à UnB, todos os professores com quem tive contato. Nas discussões ou em sala de aula, sempre alguma ideia se formava ou uma resposta tomava corpo. Obrigada também aos coordenadores do curso de Geociências pelas dúvidas elucidadas.

Agradeço aos membros da minha banca de qualificação, Prof. Pires que acompanhou desde o início o desenvolvimento desse projeto. Ao Prof. Claudinei pela participação e sugestões e ao Prof. Marini, com o qual tive o grande prazer de conhecer a história prospectiva do Quadrilátero Ferrífero. Ao Prof. Alexandre por suas cuidadosas correções. O meu muito obrigada por todas as discussões e direcionamento.

Aos colegas que encontrei nessa caminhada, obrigada pelos momentos de descontração. Pessoas com quem estudei e que de alguma forma fizeram parte desse caminho (Simone, Luciane, Thamiris, Polyana, Endel, entre outros).

Agradeço às meninas que me receberam na Austrália, Jéssica Bogossian e Lara Nigro. Obrigada pelos momentos, conversas e pela vivência. À Flávia Braga, aluna da UFMG, a qual dividi uma casa e muitos momentos na UWA.

Agradeço ao meu marido, Marcelo Januário de Sousa, pelo seu amor e por estar sempre ao meu lado.

Por fim, sou grata ao Universo e as forças que mantiveram firme em um propósito.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
	1.1 Apresentação e justificativas.....	1
	1.2 Questões fundamentais	3
	1.3 Objetivos	7
	1.4 Estrutura da tese	7
	1.5 Localização das áreas-teste	8
	1.6 Materiais & métodos.....	10
	1.6.1 Materiais utilizados na análise em escala de província (1:500.000)	10
	1.6.2 Materiais utilizados nas análises em escala de distrito e bloco (1:100.000 e 1:50.000)	11
	1.6.3 Métodos de trabalho.....	12
	1.7 Contexto geológico-regional e mineralizações de ouro.....	17
	1.7.1 Embasamento	17
	1.7.2 Sequências supracrustais do tipo greenstone belt	18
	1.7.3 Coberturas sedimentares plataformais	23
	1.7.4 Metamorfismo.....	23
	1.7.5 Mineralizações	23
2	O conceito de sistemas minerais e sua aplicação na seleção de áreas potenciais para exploração mineral	25
	2.1 O conceito de sistemas minerais (SM)	25
	2.2 Definição dos principais elementos e componentes de um sistema mineral	29
	2.3 A construção de modelos de favorabilidade utilizando sistemas minerais	33
	2.3.1 – Tipo de modelagens	33
	2.3.2 Novo cenário para geração de modelos de potencialidade mineral	35
	2.4 A aplicação dos conceitos de sistemas minerais no estudo das mineralizações auríferas hospedadas em <i>greenstone belts</i>	38
	2.4.1 Fonte e natureza do fluido	40
	2.4.2 Migração de fluidos e ambientes de deposição	43
3	As ferramentas de avaliação econômica na exploração mineral.....	46
	3.1 Ferramentas tradicionais e/ou determinísticas	46
	3.1.1 Fluxo de caixa	47
	3.1.2 Valor presente e valor presente líquido	49
	3.1.3 Retorno do investimento (Payback).....	50
	3.2 Métodos probabilísticos	50
	Valor esperado ou VPL:	51
	Árvore de Decisão:	51
	Simulação de Monte Carlo	52
	3.3 Sistemas minerais e as ferramentas de análise de investimento	52
4	Resultados	57
	4.1 Modelo Conceitual – Sistema Mineral Rio das Velhas (SMRV) e Modelagem Espacial.....	58

4.2	Artigo 01 - <i>Multi-process and multi-scale spatial predictive analysis of an orogenic gold system, Rio das Velhas Greenstone Belt, Brazil</i>	64
4.3	Artigo 02 - <i>Decision Analysis for Early Stages of Mineral Exploration – A Resource Assessment in Rio das Velhas Greenstone Belt</i>	109
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	132

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Capítulo 1

Figura 1.1- Estágios da Exploração Mineral [modificado de Moon <i>et al.</i> , (2006); P.C.F Crowson in Egget, Roderrick (1987)]. Indicação dos custos em cada fase, estimados a partir do GCA - Serviço Geológico do Canadá (http://publications.gc.ca/collections/collection_2008/inac-ainc/R2-466-2007E.pdf 5	5
Figura 1.2- Classificação de recursos e reservas (Tulcanaza, 2014). 6	6
Figura 1.3 – Mapa Simplificado do Quadrilátero Ferrífero (A) e do <i>Greenstone Belt</i> Rio das Velhas (B). Os polígonos representam a Localização das área-teste que serão modelados nesta tese. O polígono em cinza representa a área de estudo na “escala de província”, o polígono vermelho representa a área de estudo na “escala de distrito” e o polígono em negro acompanha a área do Greenstone Belt Rio das Velha e representa a área avaliada em “escala de bloco”. 9	9
Figura 1.4- Etapas e métodos empregados na de elaboração desta pesquisa 15	15
Figura 1.5 - Mapa Geológico Simplificado do Rio das Velhas segundo Baltazar & Zuchetti (2007). 21	21
Figura 1.6 – Mapa de Domínios Tectônicos segundo Baltazar & Zuchetti (2007). 22	22
Tabela 1.1- Estágios da Exploração Mineral [modificado de Valleé & Bouchard (2001)]. Fluxo exploratório de Projeto - Indicação do tempo de maturação em cada estágio compilado a partir do relatório AngloGold Ashanti (2010). Atentar para indicação do potencial hipotético.16	16

Capítulo 2

Figura 2.1 – Componentes de um sistema mineral e footprint de um depósito como resultado de processos geológicos em várias escalas – (Australian Academy of Science, 2012). 28	28
Figura 2.2 - Elementos críticos de um Sistema Mineral segundo McCuaig & Hronsky (2014). 29	29
Figura 2.3 – Diagrama Esquemático de um Sistema Mineral exemplificando os componentes de um sistema hidrotermal de formação de um depósito mineral (Modificado de Hagemann & Cassidy, 2000, Hagemann <i>et al.</i> , 2016). 30	30
Figura 2.4 – Modelo esquemático de organização de um Sistema Mineral [modificado de McCuaig <i>et al.</i> , (2014)]. 32	32
Figura 2.5 – Elementos de um modelo de prospectividade mineral (modificado de Carranza, 2009) 34	34
Figura 2.6 – A) Depósitos auríferos associados a diferentes ambientes tectônicos. O ouro orogênico se forma na colisão ou acreção continental (Groves <i>et.</i> , (1998) B) Níveis de profundidade para formação de depósitos em ambiente compressional/transpressional. 39	39
Figura 2.7 A – Em A) Frequência de evolução da crosta continental juvenil. Em B) – a distribuição de eventos de plumas mantélicas. Observar as idades entre 2.7 a 25 Ga destacadas em vermelho (Groves <i>et al.</i> , 2005). 40	40

Figura 2.7 B-	Distribuição de depósitos no tempo geológico em ambientes orogênico em margens convergentes. Observar os depósitos auríferos orogênicos destacados pelo retângulo em vermelho (Groves <i>et al.</i> , 2005).....	40
Figura 2.8-	(A) Modelo que representa a história do metamorfismo regional em rochas máficas arqueanas sob a ação de processos que ocorrem no assoalho oceânico que ditam a composição do início do metamorfismo, especialmente o conteúdo de voláteis (CO ₂). Em (B), pico sin-metamórfico da formação dos depósitos auríferos como postulado no modelo contínuo, ilustrando a ação da temperatura-tempo no processo de metamorfismo (modificado de Phillips & Powell (2009).	41
Figura 2.9	–Possíveis cenários relacionados à devolatização de rochas ao longo de margens continentais, geração de fluidos e formação de mineralizações auríferas. A Linha pontilhada (A) representa o limite das fácies Anfibolito e (G), Fácies Xisto Verdes. (Modificado de Goldfarb & Groves, 2015).....	42
Figura 2.10	Comparação entre os fatores de enriquecimento para metais-base em depósitos Auríferos Arqueanos versus Depósitos de Sulfetos Maciços. (Groves & Barley, 1988 in Foster, 1990.)	43
Figura 2.11	Representação dos três elementos que dirigem o fluxo do fluido.....	44
Figura 2.12	Dinâmica da migração dos fluidos em depósitos orogênicos auríferos. (Modificado de Goldfarb <i>et al.</i> , 2005).....	45
Tabela 2.1	- Métodos de Análise Espacial a serem utilizados nesta tese (Bonham-Carter, 1994; Silva, 1999, Kreuzer et al., 2010; Lisitsin, 2015).	36

Capítulo 3

Figura 3.1	– Representação do Fluxo de Caixa de um projeto de ouro desenvolvido desde a fase prospecto até a delimitação da Reserva. O asterisco indica o momento presente. Para um melhor entendimento das fases consultar a Tabela 1.1	47
Figura 3.2	- Árvore de decisão para um projeto exploratório estático – Stanlay (1994).	52
Figura 3.3A	– Parte I Exemplo de Mapa de “Play”. Aplicação do Sistema Petrolífero na Exploração de óleo e Gás (Allen & Allen, 2005).....	53
Figura 3.3B	– Parte II Exemplo de Mapa de “Play”. Aplicação do Sistema Petrolífero na Exploração de óleo e Gás, Allen & Allen (2005).....	53
Figura 3.4	– Mapa de avaliação de Risco Exploratório (Allen & Allen, 2005).	54
Figura 3.5	– Exploração sem uma estratégia, em (b) utilizando-se o sistema petrolífero, (Duff & Hall, 1996).....	55
Figura 3.6	– Modelo de decisão integrado, conjugando a abordagem dos métodos quantitativos e as ferramentas de análise de investimento, modificado de Kreuzer et al., (2008). O modelo probabilístico do sistema mineral foi elaborado por Lord <i>et al.</i> , 2001).	56
Tabela 3.1.	– Estimativas de custo (Despesas do Fluxo de Caixa) para Exploração Mineral.....	48

1.1 Apresentação e justificativas

A exploração mineral compreende três etapas principais: o desenvolvimento de uma estratégia de negócios, a concepção e aplicação de um modelo para seleção de áreas potenciais e, posteriormente, o *follow-up* cujo objetivo é a detecção direta de regiões com alta favorabilidade (Hronsky & Groves, 2008).

Segundo Hronsky & Groves (2008), o principal desafio geocientífico na exploração mineral é como gerar um modelo conceitual que possa compreender o risco, otimizar o tempo e por consequência, aumentar o custo benefício dentro de um programa exploratório. Por outro lado, para efetuar uma análise espacial utilizando métodos estatísticos que levem em conta o potencial mineral de uma determinada região (Boham-Carter, 1994; Silva, 1999; Nykänen & Ojala (2007), Carranza (2009), Porwal & Carranza (2015), deve-se seguir o princípio de que um depósito é parte de um sistema mineral mais amplo e, portanto, a seleção de áreas deve ser efetuada em diferentes escalas: global, província, distrital e blocos (Wylborn *et al.*, 1994).

A escolha do método de análise espacial deve considerar se o estágio de exploração é inicial, ou seja, em escala de província, em escala de distrito ou contíguo a um depósito já explorado. Para tanto, é necessário o desenvolvimento de um fluxo de exploração que conduza o rito na maioria das companhias e do setor mineral (figura 1.1).

Vários trabalhos de análise espacial aplicados à exploração mineral vêm sendo desenvolvidos desde os meados da década de oitenta (Bonham-Carter, 1994; Agteberg & Bonham-Carter, 1989; Silva, 1999; Silva *et al.*, 2003; Nykanen & Ojala, 2007), no entanto, os modelos utilizando lógica fuzzy, métodos probabilísticos ou redes neurais focavam em áreas específicas. Atualmente, o grande diferencial é a seleção de áreas potenciais para exploração em multiescala e em multiestágios considerando o conceito de sistemas minerais (Wylborn *et al.*, 1994, Kreuzer *et al.*, 2008, Lisitsin *et al.*, 2010). Nessa perspectiva, um depósito mineral pode ser considerado como o resultado de um processo de transferência de energia em diversas escalas, cuja assinatura (*footprint*) regional difere daquela observada *in loco* por métodos tradicionais. Isso fará com que a pesquisa seja mais efetiva nas regiões que venham a ser prospectáveis, com a definição

de alvos e otimização da avaliação econômica (Singer & Kouda, 1999; Porwal & Kreuzer, 2010).

A análise espacial utilizando *expert systems* é um método quantitativo que pode ser utilizado para o entendimento da incerteza geológica em fases iniciais de pesquisa. Para tanto, é necessário a compreensão do significado de um ativo mineral, pois diferencia-se de outros investimentos financeiros em função de sua natureza. Dentre as diversas diferenças, destaca-se a imprecisão ligada a condição geográfica (rigidez locacional) e a identificação dos parâmetros econômico-financeiros acerca desse ativo (Tulcanaza, 2015). A incerteza geológica associada a continuidade e qualidade da mineralização identificada são as principais justificativas dessa imprecisão. Esse caráter probabilístico adiciona outra vulnerabilidade ao ativo: o risco exploratório (Tulcanaza, 2015).

Conceitua-se o risco como a probabilidade de fracassos e sucessos da mineralização interceptada ser potencialmente econômica (Singer & Kouda, 1999). A avaliação do risco é fundamental para a tomada de decisão na gestão de programas exploratórios. Na mineração, bem como em outras indústrias, programas e projetos competem entre si, em consequência da limitação orçamentária. Logo, ao optar por um prospecto em detrimento de outro pode-se limitar as chances de sucesso em áreas promissoras.

A potencialidade de áreas promissoras pode ser medida ou inferida a partir dos modelos de favorabilidade utilizando diferentes técnicas de análise espacial em ambiente computacional de Sistema de Informações Geográficas (SIG), como citado anteriormente. A parte final do fluxo exploratório, quando existe sucesso exploratório, é o delineamento de recursos e posteriormente de reservas, a partir do estudo da viabilidade econômica (Figura 1.2). Durante todo esse processo, são tomadas decisões com relação ao potencial geológico e ao possível retorno econômico desse ativo.

A presente tese de doutorado tem como foco o aprimoramento do método para análise de investimento em exploração mineral que integre a análise espacial, sob a ótica dos Sistemas Mineraiis, e a avaliação econômica. Esse método será testado no *Greenstone Belt* Rio das Velhas onde serão aplicadas técnicas de análise espacial em multiescalas e em multiestágios de forma a selecionar áreas de maior potencial mineral para ouro orogênico. Adicionalmente, será calculado para o Rio das Velhas e distritos

auríferos mineiros, onde essas áreas potenciais estão localizadas, o número depósitos não descobertos, assim como, os valores em metal contido dos seus recursos hipotéticos. Posteriormente, uma avaliação econômica será empiricamente efetuada, valorando-se em um primeiro momento, o possível retorno financeiro para um prospecto. Três cenários serão testados de forma a oferecer uma análise mais abrangente para o tomador de decisão, calculando-se o valor esperado. Por fim, as áreas foram priorizadas conforme sua probabilidade de sucesso e potencial mineral.

1.2 Questões fundamentais

Este trabalho visa analisar como e quanto a integração do conceito de Sistemas Minerais (SM) e Avaliação Econômica pode facilitar a decisão orçamentária na exploração e, por fim, auxiliar no processo de tomada de decisão ao se investir em prospectos minerais em uma determinada região. Para tanto, escolheu-se o *Greenstone Belt* Rio das Velhas (GBRV) como área de estudo e o ouro como a *commodity* a ser estudada.

O GBRV está inserido no Quadrilátero Ferrífero, uma província aurífera madura e mundialmente conhecida, que constitui uma área chave para este tipo de pesquisa. Nessa região, o sistema mineral “ouro orogênico” em ambiente *greenstone belt* está bem caracterizado e fornece o arcabouço teórico necessário para este trabalho (Bohlke, 1982; Colvine *et al.*, 1984; Berger, 1986; Groves & Foster, 1991; Dubé *et al.*, 2004; Goldfarb *et al.*, 2005). O avanço dos trabalhos desenvolvidos na região – por meio de contribuições de acadêmicos (Ribeiro-Rodrigues, 1998; Lobato *et al.*, 1988; Silva, 1999; Silva, 2006; Beleque, 2015), do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Baltazar & Zuchetti, 2007) e da indústria – permitem sumarizar os principais vetores exploratórios. Esses dados foram utilizados para a geração dos diferentes cenários prospectivos, visto que os controles das mineralizações e os seus respectivos vetores são mais consolidados que em qualquer outra província aurífera brasileira.

Com base nessas escolhas, as questões chaves a serem abordadas nesta tese de doutorado são:

- Qual método deve ser utilizado para a priorização de prospectos nos estágios de um programa de exploração mineral?
- Como pode ser avaliado o risco em um programa exploratório nas fases iniciais da exploração mineral?

- Como selecionar projetos ou alvos dentro de um programa exploratório considerando-se o risco e a incerteza geológica?

A partir dessas questões, de acordo com o desenvolvimento do referencial teórico, a observação de dados secundários e a integração final, esta tese parte da seguinte hipótese de trabalho: um programa exploratório contém um conjunto de projetos e alvos. Esses projetos ou alvos são mutuamente excludentes sob o ponto de vista orçamentário. Isso significa que serão ordenados quanto às prioridades e selecionados conforme seus desempenhos. Para o processo de tomada de decisão e avanço dos estágios exploratórios, é possível estabelecer critérios com base na análise prospectiva, de forma a entender o risco e a incerteza geológica. Para estimar um possível desempenho do projeto, será utilizado o conceito de valor esperado.

Esse pressuposto se fundamenta na probabilidade do potencial mineral e, posteriormente, no cálculo do valor esperado de prospectos, para que, assim, seja viável a sua priorização. Ao ordená-los, em termos de critérios exploratórios e financeiros, presume-se que o processo decisório seja otimizado e menos subjetivo.

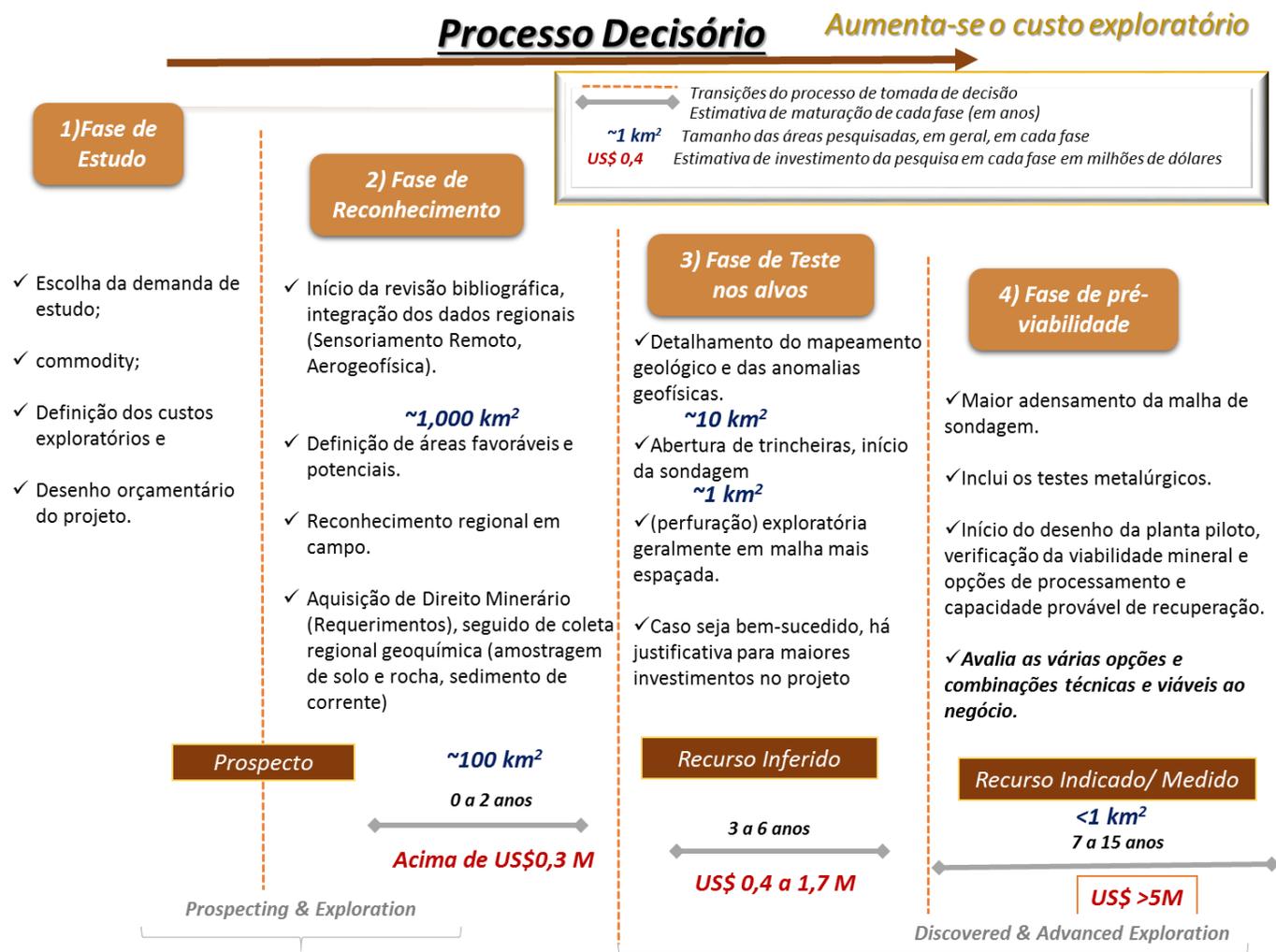


Figura 1.1- Estágios da Exploração Mineral [Modificado de Moon et al., (2006); P.C.F Crowson in Eggert (1987)]. Indicação dos custos em cada fase, estimados a partir do GCA - Serviço Geológico do Canadá (http://publications.gc.ca/collections/collection_2008/inac-ainc/R2-466-2007E.pdf)

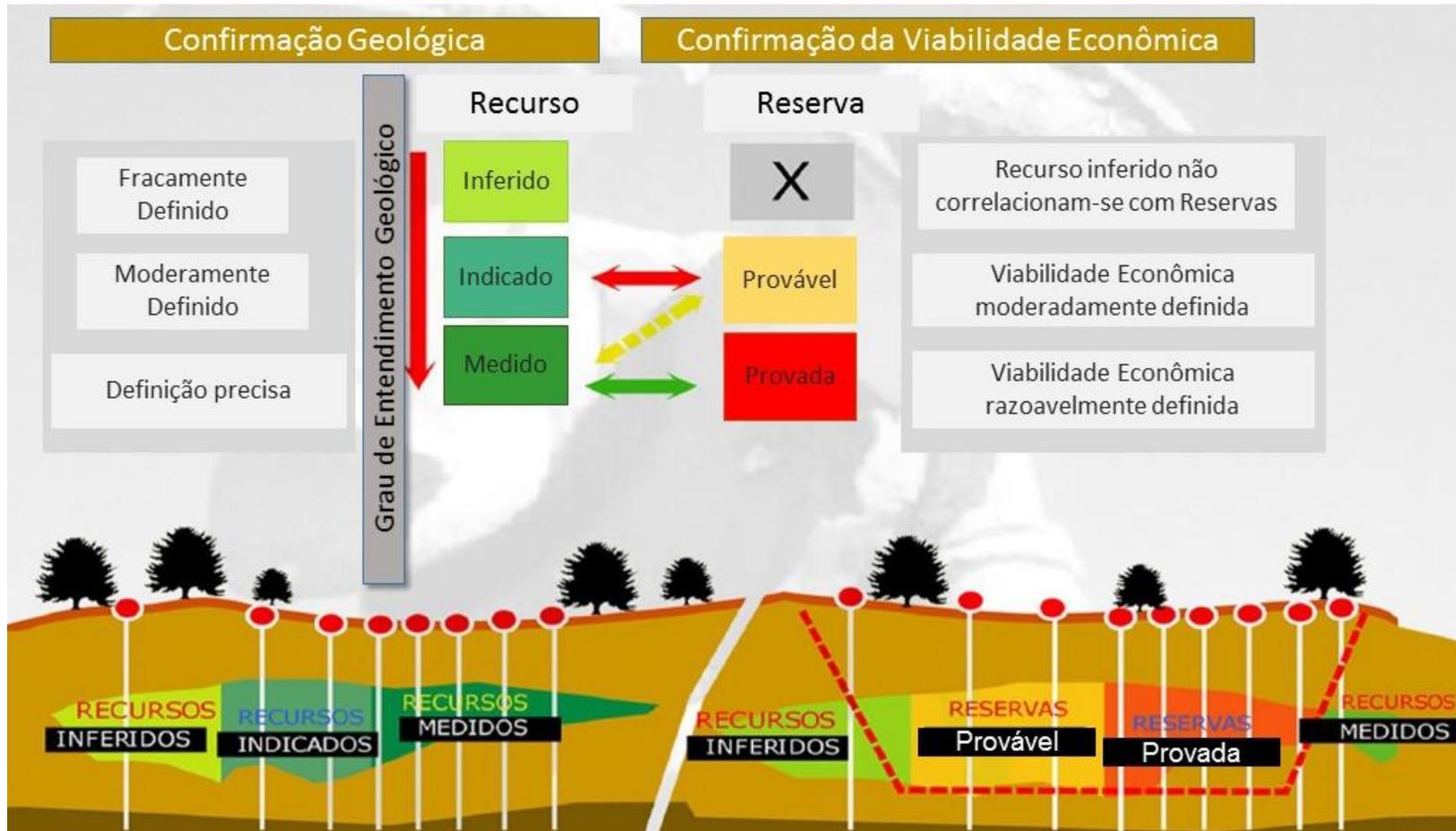


Figura 1.2- Classificação de recursos e reservas (Tulcanaza, 2014).

1.3 Objetivos

O objetivo principal é desenvolver um método para a priorização de prospectos minerais a partir da integração de técnicas de mapeamento do potencial mineral, com a abordagem de SM, e as ferramentas de Avaliação Econômica.

Para tanto, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar o Sistema Mineral Ouro Orogênico no Greenstone Belt Rio das Velhas a partir da interpretação dos dados multifonte (geológicos, geofísicos e geoquímicos);
- definir os critérios para modelagem em multiescala e multiestágios, utilizando as características do Sistema Mineral Ouro Orogênico do Greenstone Belt Rio das Velhas;
- criar modelagem utilizando técnicas de Análise Espacial para geração de diferentes cenários do potencial aurífero;
- valorar as áreas potenciais com o método “valor econômico esperado”; e
- priorizar áreas para avaliação e exploração aurífera seguindo-se critérios econômicos e exploratórios.

1.4 Estrutura da tese

Esta pesquisa está estruturada em três partes. A primeira apresenta uma breve revisão sobre o contexto geológico da área de estudo, como também a recapitulação de conceitos importantes sobre os temas abordados, são eles: Sistemas Minerais, Análise Espacial e Avaliação Econômica.

Os resultados deste trabalho são apresentados em dois artigos. O primeiro, intitulado “*Multi-process and multi-scale spatial predictive analysis of an orogenic gold system, Rio das Velhas Greenstone Belt, Brazil*”, contempla a elaboração do modelo conceitual do Sistema Mineral Rio das Velhas, a aplicação dos métodos de análise espacial, bem como, a simulação de um programa exploratório apresentando três cenários de mapas de favorabilidade mineral em três escalas: Província, Distrito e Blocos.

O segundo artigo apresenta os resultados do modelo de estimativa de teor e tonelagem para os distritos ou áreas priorizadas na análise espacial na escala de Blocos. Discuti também, uma análise econômica para um prospecto hipotético, assim como, os parâmetros para seleção das áreas potenciais identificadas nos resultados da análise espacial.

1.5 Localização das áreas-teste

A análise adotada nesta tese foi efetuada em multi-escalas. Para tanto, foram escolhidas três áreas-teste para a realização da modelagem. O modelo em escala de província, nomeado de M1, compreende todo o Quadrilátero Ferrífero. Ele foi integrado na escala 1:500.000 e delimitou o *endowment* aurífero arqueano, que contextualiza o potencial metalogenético para depósitos orogênicos, selecionando-se o ambiente tectônico do GBRV. O modelo seguinte, M2, em escala intermediária (1:100.000), caracterizou os diferentes distritos auríferos arqueanos que ocorrem no *greenstone*. Por último, o modelo em escala de semidetalhe, M3 (1:50.000), abrange os possíveis alvos exploratórios em cada distrito. As áreas dos modelos M1, M2 e M3 são apresentadas na Figura 1.3 e posicionadas no contexto geológico-tectônico regional.

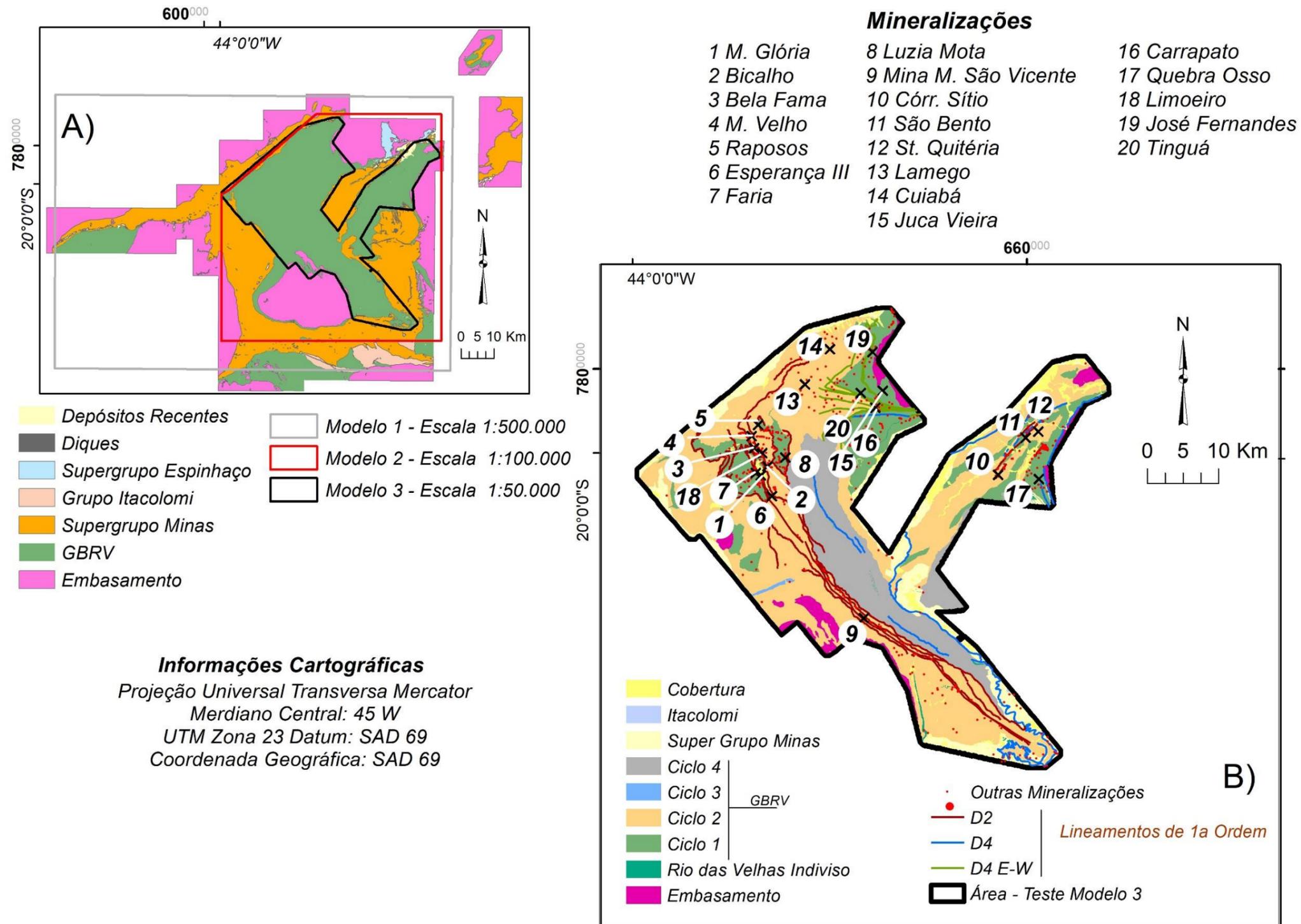


Figura 1.3 – Mapa Simplificado do Quadrilátero Ferrífero (A) e do Greenstone Belt Rio das Velhas (B). Os polígonos representam a Localização das área-teste que serão modelados nesta tese. O polígono em cinza representa a área de estudo na “escala de província”, o polígono vermelho representa a área de estudo na “escala de distrito” e o polígono em negro acompanha a área do Greenstone Belt Rio das Velha e representa a área avaliada em “escala de bloco”.

1.6 Materiais & métodos

1.6.1 Materiais utilizados na análise em escala de província (1:500.000)

1.6.1.1 Dados geofísicos e de Sensoriamento Remoto

✓ Gravimetria

Os dados gravimétricos satelitais foram adquiridos por meio da missão *Gravity Recovery and Climate Experiment - Grace*, que foi desenvolvida pela Agência Espacial Norte-Americana (Nasa) em conjunto Centro Alemão de Pesquisa Aérea e Astronáutica (DLR – *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt*). A partir do seu lançamento, em 2002, o objetivo foi o fornecimento de modelos de alta-resolução do campo de gravidade terrestre, calculados a partir de coeficientes do geopotencial, em um período de cinco anos. A resolução do dado é 2' x 2' arcos de minuto.

O programa Grace consiste em dois satélites que orbitam em conjunto há uma distância de 220 km. O seu rastreo é obtido por meio de GPS e um por um link de rádio entre os dois satélites. Essa ligação permite uma medição mais precisa das perturbações provocadas pelo campo gravitacional terrestre. Seus dados científicos permitem uma estimativa dos modelos globais das variações do campo gravitacional da Terra, aproximadamente a cada trinta dias.

✓ Dados aerogeofísicos

Foram utilizados três diferentes levantamentos de dados aerogeofísicos. Primeiro, o Levantamento 1, que é o Projeto do Convênio Brasil-Alemanha (CGBA) realizado na década de 1970, trazendo apenas o levantamento aeromagnético. A altura de voo é de 350 m, direção das linhas de levantamento E-W espaçadas a cada 2 km, com linhas de controle perpendiculares N-S. Esse projeto foi apenas utilizado para a interpolação de valores em que os outros dois levantamentos principais que recobrem a área não se sobrepõem.

O Levantamento 2 é o Rio das Velhas, que recobre todo o GBRV na porção central do Quadrilátero Ferrífero. Ele foi realizado em 1992 e utilizou os métodos magnéticos, radiométricos e eletromagnéticos (HEM). O foco foi o estudo das mineralizações auríferas que ocorrem na área. Participaram do levantamento o DNPM, incluindo diversas mineradoras, além da fundação Gorceix. A altura de voo foi de 60 m, com direção principal de N40°W e N50° E, espaçamento de 250 m e linhas de controle N-S.

Por fim, o Levantamento 3 corresponde à área II do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (PLAMG) executado entre os anos 2000 e 2001 com altura de voo de 100 m, linhas de voo espaçadas a cada 250 m e linhas de controle de 2.500 m. Essa área é dividida em dois blocos: oeste, com linhas de voo orientadas N30°E e de controle N60°W; e leste, com linhas de voo de direção N30°W e de controle N60°E.

✓ **Modelo de Elevação - SRMT (*Shuttle Radar Topography Mission*)**

A agência espacial norte-americana (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA) em conjunto com a Agência Nacional de inteligência Geoespacial (*National Geospatial-Intelligence Agency* - NGA), são as responsáveis pela obtenção dos dados do SRTM por meio de interferometria. Esses modelos apresentam uma resolução de 90m (3s de arco), interpolados para 30m. Essas SRTM foram utilizadas apenas como apoio na interpretação geológica-geofísica da área, auxiliando principalmente na análise da topografia da região.

1.6.1.2 Dados geológicos

✓ **Mapa geológico de Minas Gerais**

O Mapa Geológico na escala 1:1.000.000 é resultado do Programa Geologia do Brasil, Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil – Projeto Mapas Geológicos Estaduais. Esse Projeto foi executado pelo Serviço Geológico (CPRM) e pela Companhia de Desenvolvimento Econômico do Estado de Minas Gerais (Codemig) em 2010. Para a compilação do mapa, foram utilizadas várias cartas ao milionésimo, além de atualizações em escalas maiores de (1:250.000 e 1:100.000).

1.6.2 Materiais utilizados nas análises em escala de distrito e bloco (1:100.000 e 1:50.000)

✓ **Dados aerogeofísicos**

Foi utilizado o recorte da integração dos dados magnetométricos dos levantamentos CGBA, Rio das Velhas e do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais (PLAMG) para a elaboração do modelo em escala de distrito (M2). Para o modelo em escala de blocos (M3), utilizaram-se os produtos dos dados magnetométrico, eletromagnético e gamaespectrométrico do levantamento do Rio das Velhas.

✓ **Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero**

Os dados geológicos do Quadrilátero Ferrífero (QF) utilizados nesta modelagem foram extraídos do Projeto intitulado Integração e Correção Cartográfica em SIG (Lobato, 2005). Esse projeto teve a participação e o apoio de diversas instituições públicas e privadas. O mapa resultante é apresentado em escala 1:50.000 e compila as cartas do Projeto USGS e DNPM (1946-1964), além do trabalho de Baltazar & Silva (1996) na escala 1:100.000.

✓ **Dados geoquímicos**

Os dados geoquímicos utilizados na pesquisa foram adquiridos no Projeto Quadrilátero Ferrífero da CPRM em 2015 (Larizatti, 2005) e compreendem tanto amostras de solo como de sedimento de corrente. Elas foram analisadas para 53 elementos pelo método ICPMS, peneiradas e pulverizadas nas frações <#80 (0,175 mm) e < 200# (0,075 mm), respectivamente, para os dois tipos de amostra. A densidade de amostragem para o levantamento de solo foi de uma amostra a cada 115 km².

1.6.3 Métodos de trabalho

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, quatro fases são propostas, resumidas e esquematizadas na figura 1.4.

✓ **Fase I: pesquisa bibliográfica**

Essa etapa foi focada em quatro eixos teóricos principais: (1) entendimento dos modelos metalogenéticos de formação dos depósitos de ouro associados aos greenstone belts; (2) caracterização dos controles da mineralização auríferas e dos vetores exploratórios no Greenstone Belt Rio das Velhas; (3) revisão e elaboração da metodologia de Análise Espacial; e (4) estudo de técnicas e procedimentos para a análise econômica.

✓ **Fase II: elaboração da base de dados**

Nessa etapa, foi elaborado uma base de dados em formato Microsoft Access contendo as informações tabulares dos dados, como também os arquivos digitais.

✓ **Fase III: mapa de favorabilidade mineral**

A integração dos dados geológicos regionais (1:500.000) e dos dados de detalhe (1:50.000) bem como o entendimento da fase de revisão bibliográfica auxiliaram no entendimento dos principais controles da mineralização. A integração e interpretação

desses dados embasou o entendimento e a caracterização do Sistema Mineral Rio das Velhas.

Os mapas de favorabilidade mineral foram elaborados por meio da extensão ArcSDM (*Spatial Data Modeller*), desenvolvida para ArcGIS. Os dados geofísicos aéreos e de sensores remotos foram realçados por meio de técnicas de processamento digital de imagem, conforme o modelo exploratório desenvolvido para o SM Rio das Velhas.

A última etapa é seleção de áreas potenciais, onde compreenderá o cálculo da matriz de probabilidade computando os pesos referentes aos componentes do SMRV.

✓ **Fase IV análise econômica**

Curvas de teores e tonelagens foram calculadas para a área total do modelo M3, bem como para os distritos minerais.

Será simulado um fluxo de caixa simplificado para um prospecto hipotético, onde o objetivo será a valoração de três cenários, denominados de 3A, 3B e 3C. Essas alternativas referem-se às áreas potenciais mapeadas para o modelo M3. Após o cálculo do VPL (Valor presente líquido) resultante do fluxo de caixa, foram calculados os valores esperados considerando-se o risco exploratório. Para a geração dos diferentes cenários, será utilizado o *software* da Palisade, denominado @Risk³.

As áreas potenciais mapeadas no Modelo de Blocos (M3) foram chamadas de prospectos em áreas provadas e prospectos em áreas não provadas (novas áreas potenciais). Essa nomenclatura é derivada dos templates da *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standard (Crisrsco)*. Os prospectos em áreas provadas poderão conter ocorrências e também depósitos com recursos classificados ou reservas calculadas. Ressalta-se que, mesmo assim, não foram enquadrados em nenhuma categoria, pois os resultados obtidos nas áreas-teste referem-se a um trabalho de compilação. Assim, são considerados apenas recurso hipotético (Tabela 1.1 e Figura 1.2).

✓ **Integração final e processo decisório**

Nessa etapa, são integrados os resultados do mapa de favorabilidade mineral, elaborados a partir da construção do modelo de Sistemas Mineral para o Rio das Velhas,

e da análise econômica. O foco será a priorização dos prospectos e o processo de tomada de decisão.

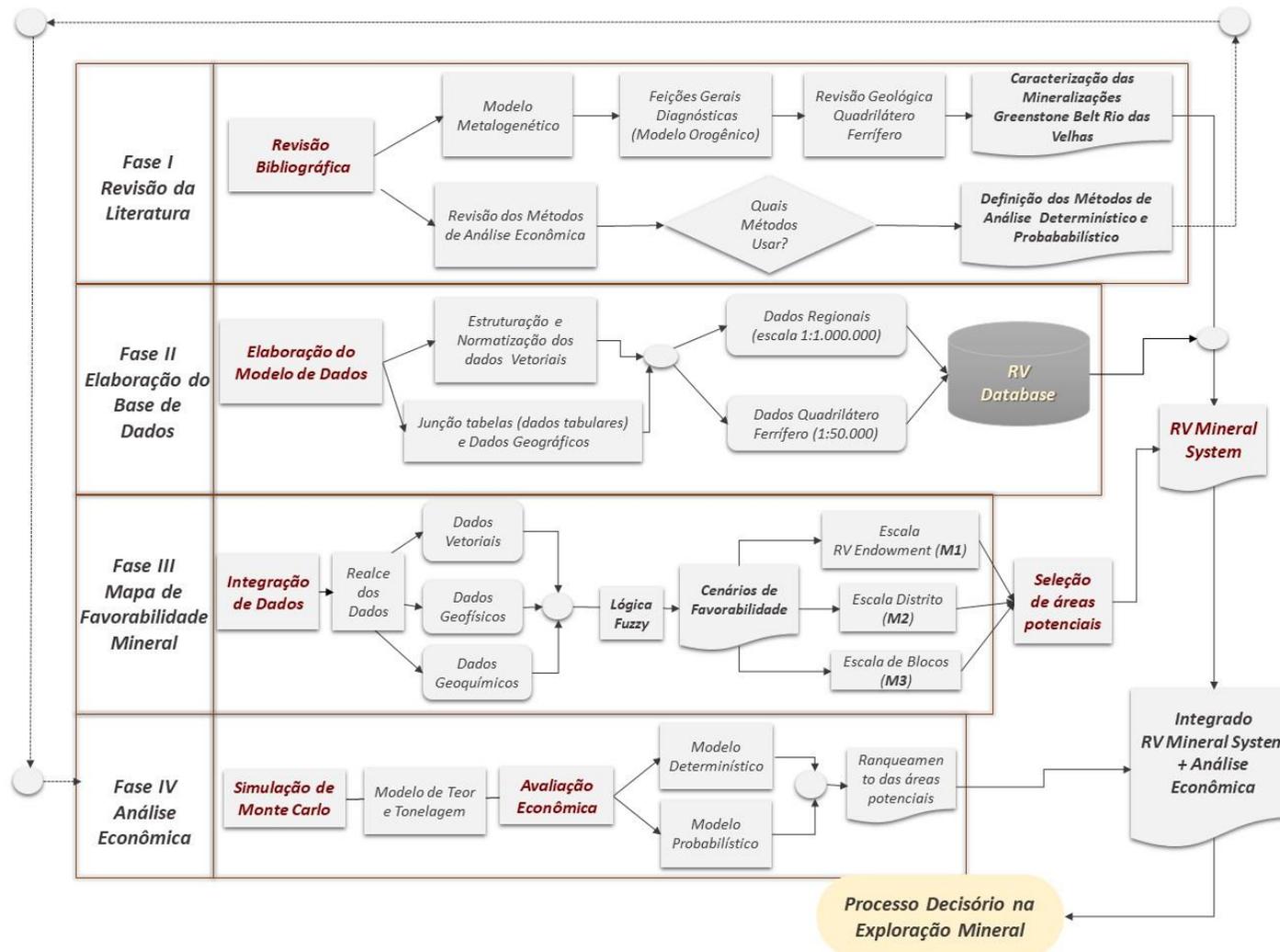


Figura 1.4- Etapas e métodos empregados na de elaboração desta pesquisa.

Tabela 1.1- Estágios da Exploração Mineral [Modificado de Valleé & Bouchard (2001)]. Fluxo exploratório de Projeto - Indicação do tempo de maturação em cada estágio compilado a partir do relatório AngloGold Ashanti (2010). Atentar para indicação do potencial hipotético.

Fase	Avaliação de Recursos Minerais	Exploração Mineral					Avaliação do Depósito	
		Requerimento de Pesquisa		Alvará de Pesquisa			Portaria de Lavra	
Estágio	Várias pesquisas e sínteses	Estágio 1 Planejamento da Exploração	Estágio 2 Pesquisa e reconhecimento regional	Estágio 3 Prospecção de Anomalias	Estágio 4 Verificação de Anomalias x Mineralização	Estágio 5 Descoberta e delimitação do Depósito Mineral.	Estágio 7 Definição do Depósito Mineral	Definição dos Projetos de Engenharia, econômico e adensamento dos estudos de Viabilidade.
Objetivo	Suprimento Mineral.	Seleção de commodities (bem mineral). Definição objetivos da exploração.	Pesquisa e Delimitação de anomalias de vários métodos (Geoquímicos, geofísicos). Seleção de áreas potenciais.	Confirmação da presença, locação exata de anomalias. Aquisição de Alvará de Pesquisa	Investigação da causa das anomalias. Procura de mineralizações. Aquisição adicional de Alvará de Pesquisa ou Redução de área.	Descoberta, delimitação e interpretação do teor, qualidade e tonelagem do novo depósito mineral. Identificação do potencial mineral do depósito é de interesse econômico para justificar o detalhamento da prospecção.	Definição de limites e distribuição interna dos teores mineralógicos e características do depósito. Aquisição de dados para estimativa de custos de engenharia.	
Métodos de Avaliação	Geocientífico e econômico, pesquisas, compilações e sínteses por instituições governamentais, universidades e indústria mineral.	Pesquisa de mercado. Revisão geológica e sobre modelos metalogenéticos. Pesquisa fiscal, legal e contexto sócio-econômico.	Levantamentos Aerogeofísicos. Interpretação de dados de sensores remotos. Pesquisa Geológica; Geoquímica. Métodos de seleção de anomalias.	Prospecção geofísica, geológica e geoquímica. Avaliação de anomalias e redução de áreas de anomalias.	Mapeamento geológico e outras pesquisas. Amostragem de trincheira, sondagem. Levantamento geofísico terrestre. Avaliação dos resultados, recomendações para trabalhos futuros e seleção de alvos.	Trincheiras, mapeamento, sondagem, geofísica terrestre. Testes iniciais de processamento mineral. Estudos ambientais. Inventário Mineral (estimativa de recurso)	Detalhamento do Mapeamento e sondagem; Testes sistemáticos mineralógicos e de processamento mineral. Detalhamento dos estudos ambientais. Análises técnicas de risco e pré-viabilidade econômica.	
Resultados	Mapas, base de dados, ferramentas e modelos.	Programas Exploratórios	Anomalias Regionais	Anomalias Locais	Delimitação de mineralizações	Depósito Mineral	Avaliação do Projeto Mineral	
Inventário Mineral	Potencial Mineral não Definido (Prospecto)					Recurso Inferido	Delimitação da Reserva Mineral	
	Potencial Especulativo		Potencial Hipotético				Recurso Indicado	Indicada e Medida
	Erro de Estimativa (Margem de erro da estimativa de tonelagem/teor do projeto/alvo) 90%					100%	+/- 50% a +/- 30%	Indicada : +/- 50% a +/-30% Medida: +/- 20% a +/-10%
Investimento	Moderado	Baixo, no entanto desdobra-se em múltiplos investimentos				Grande acréscimo de múltiplos investimentos.		
Nível de Risco	Baixo	Muito alto (decrece a partir do fracasso e perdas financeiras)				Alto (decrece a partir do fracasso e perdas financeiras)		

4 a 5 anos 3 a 4 anos 2 a 3 anos 1 a 2 anos

1.7 Contexto geológico-regional e mineralizações de ouro

O QF é uma importante província metalogenética (Fe, Au, Mn) distribuída em uma área de 7.000 km², situada na porção sul do Cráton São Francisco. Ela apresenta uma complexa evolução tectônica resultante de vários eventos termo-tectônicos que se estendem desde o Neoarqueano ao Neoproterozoico. A litoestratigrafia do QF é composta por três domínios principais: pelo embasamento que engloba os complexos granito-gnáissicos arqueanos, pelas sequências supracrustais vulcanossedimentares arqueanas do tipo *greenstone belt* e, por fim, por sequências sedimentares proterozoicas (Figura 1.5).

1.7.1 Embasamento

O embasamento (Figura 1.5) é representado por gnaisses e granitos de composição trondhjêmica-tonalítica-granodiorítica (TTG), distribuídos em complexos metamórficos: Bonfim, Caeté, Belo Horizonte, Bação e Santa Bárbara (Herz, 1970 *in* Noce, 2000) – as idades de seus protólitos variam de 3.380 a 2.900 Ma (Teixeira *et al.*, 1996). Inclui, também, duas gerações de plútons arqueanos: um de natureza cálcio-alcalina, com idade de 2.78-2.77 Ga, e outro representado por granitos anorogênicos de 2.73 a 2.61 Ga (Carneiro, 1992; Carneiro *et al.*, 1998; Machado *et al.*, 1992; Noce, 1995; Romano, 1989, *in* Baltazar & Zucchetti, 2007). Intervalos de idade entre 2.920 a 2.772 Ma, obtidos em zircões datados pelo método U-Pb (Machado & Carneiro, 1992) e uma concórdia interceptada em 2.860 + 14 Ma (Noce *et al.*, 1998), refletem um período de fusão parcial da crosta em torno de 2.9 Ga e o registro do metamorfismo mais antigo em torno de 2.77 Ga (Lana *et al.*, 2013).

Em estudos recentes, Lana *et al.* (2013) identificaram três períodos de magmatismo associado à geração TTG nos complexos granito-gnáissicos da borda meridional do Cráton São Francisco: Evento Santa Bárbara, Evento Rio das Velhas 1 e Evento Rio das Velhas 2. O estágio inicial de magmatismo, registrado entre 3.212 e 3.210 Ma, levou à formação do núcleo paleoarqueano bem representado no Complexo Santa Bárbara. O segundo evento, Rio das Velhas 1, produziu a maior parte do magmatismo TTG exposto no QF, entre 2.930 e 2.900 Ma, além das rochas máficas e ultramáficas que compõem o *Greesntone Belt* Rio das Velhas. O estágio final de geração de magmatismo TTG ocorreu durante o Evento Rio das Velhas 2, entre 2.750 a 2.700 Ma, e foi acompanhado por extenso magmatismo de arco e geração de

vulcanismo félsico, bem como pela deposição das sequências turbidíticas que compõem o *Greentone Belt* Rio das Velhas. Farina *et al.* (2015) redefinem os intervalos de idades dos eventos descritos por Lana *et al.* (2013) e identificam mais um ciclo de formação de granitos de composição de alto K, conhecido como Evento Mamona, que ocorre no período de 2.760-2.680 Ma, logo após o Rio das Velhas II.

1.7.2 Sequências supracrustais do tipo *greenstone belt*

O *Greenstone Belt* Rio das Velhas foi originalmente descrito por Dorr *et al.* (1957) como Série Rio das Velhas e, posteriormente, interpretado pelos autores Almeida (1976) e Schorscher (1976, 1978) como uma sequência do tipo *greenstone belt*. O conjunto de rochas que compõem o GBRV foi subdividido inicialmente em dois grupos (Dorr *et al.*, 1957): o Grupo Nova Lima, na base, constituído de rochas metavulcânicas (ultramáficas, máficas e félsicas) e metassedimentares, e o Grupo Maquiné, no topo, composto por conglomerados, quartzitos e filitos. Datações de U-Pb em zircões das rochas vulcânicas félsicas do Grupo Nova Lima indicam idade de 2.792 Ma para a sua deposição (Machado *et al.*, 1992), associada ao Evento Rio das Velhas 2.

A primeira divisão estratigráfica do GBRV foi proposta por Dorr *et al.* (1957), eles definiram a Série Rio das Velhas e a dividiram em grupos Nova Lima e Maquiné. Em seguida, Lockzy & Ladeira (1976) denominaram de Supergrupo Rio das Velhas, que mais tarde foi caracterizado como uma sequência do tipo *greenstone belt* por Almeida (1976) e Schorscher (1976; Lobato *et al.*, 2001). A mais recente revisão de sua compartimentação tectônico-estratigráfica é apresentada por Baltazar & Zucchetti (2007), que aplica o conceito de litofácies de Lowe (1994) e definem quatro ciclos sedimentares para o GBRV (Figura 1.5).

Segundo os autores, a distribuição espacial dos ciclos é balizada por zonas de cisalhamento que justapõem blocos tectônicos com características litoestruturais distintas. O Ciclo 1 é representado por rochas vulcânicas máficas e ultramáficas com intercalações de rochas sedimentares químicas, originadas em regime tectônico extensional de bacias de espalhamento oceânico. O Ciclo 2 é composto por associações de rochas sedimentares clásticas e químicas, associadas aos estágios iniciais de vulcanismo félsico, interpretadas como estágios finais da bacia extensional oceânica e o conjunto da fase de subducção. O Ciclo 3 compreende rochas sedimentares, pertencentes às litofácies vulcanoclásticas e de ressedimentação. Esse ciclo está

associado ao ambiente transicional de leques submarinos e sucessões não marinhas, as quais estão relacionadas a edifícios vulcânicos félsicos gerados em ambientes de arcos de ilhas. O Ciclo 4 é representado por rochas sedimentares clásticas pertencentes à associação de litofácies não marinhas. Esse ciclo é interpretado como depósitos de leques aluviais formados em bacias de retroarco com suprimento de material dos ciclos anteriores.

A estruturação tectônica do QF é complexa e foi definida por Marshak *et al.* (1992) e Marshak & Alkmim (1998) como uma província do tipo domos e quilhas. O GBRV apresenta evolução policíclica e foi submetido a vários eventos termo-tectônicos subsequentes. Esses eventos vão do arqueano ao neoproterozoico, o que ocasiona a ativação de estruturas antigas e a duplicação ou supressão de porções da estratigrafia do GBRV. Baltazar & zucchini (2007) subdividem o GBRV em quatro grandes domínios tectônicos, conforme os estilos estruturais e o *trend* de suas estruturas megascópicas (Figura 1.6). Em cada domínio (DOM 1, DOM 2, DOM 3 e DOM 4), foi identificado um grupo de feições planares e lineares relacionados às quatro gerações de estruturas (D1, D2, D3 e D4) e a três eventos tectônicos.

A primeira fase, D1, bem caracterizada no domínio tectônico DOM 1, apresenta caráter compressivo, com transporte tectônico de N para S. Essa fase é caracterizada por falhas de empurrão, com vergência para S e direção E-W. As estruturas principais são dobras abertas e isoclinais, com eixos mergulhando para ENE. A sinclinal dos Andaimés e a Falha Bem-Te-Vi são as estruturas que melhor representam essa fase D1. As estruturas da fase D2, também desenvolvidas no arqueano, apresentam as mesmas características do regime de D1, contudo o transporte tectônico é de NE para SW. As falhas de empurrão têm direção NW, incluindo, também, dobras isoclinais e apertadas, com vergência para SW e direção NW.

Essas estruturas são bem caracterizadas no domínio tectônico 2 (DOM 2), mas também podem ser encontradas em outras porções do GBRV. As principais estruturas regionais relacionadas a essa fase são as falhas Araçuruí, Córrego Areão, Tapera, São Vicente e Raposos.

As estruturas da fase D3 são observadas nas proximidades do Complexo Bação, domínio tectônico (DOM 3), e foram geradas em regime distensivo, cujo transporte tectônico deu-se de WNW para ESSE. Caracteriza-se pela nucleação de sinclinais

regionais e pela elevação do embasamento granito-gnáissico como núcleo dos complexos metamórficos. Alguns autores interpretam esse evento extensional como uma resposta ao abatimento de um Orógeno Transamazônico, que se desenvolveu na margem meridional do Cráton São Francisco, em torno de 2.1 Ga, responsável por boa parte da arquitetura de domos e quilhas do QF (Alkmim 2004; Marshak *et al.*, 1997). Nesse contexto, a fase D3, descrita por Baltazar & Zucchetti (2007), deveria incluir, também, uma fase compressiva inicial desenvolvida no estágio colisional do Orógeno Paleoproterozoico.

As estruturas geradas na fase D4 afetam todas as unidades do QF e estão mais bem caracterizadas no domínio tectônico (DOM 4). Essas estruturas foram formadas em regime compressivo durante o Evento Brasileiro. Essa fase é caracterizada por um sistema de empurrões e dobramentos com vergência de leste para oeste e inclui falhas direcionais de direção E-W.

Ressalta-se que, embora o DOM3 agrupe estruturas hoje reconhecidas como brasileiras, em alguns casos, elas foram originadas em eventos pretéritos e posteriormente reativadas, como é o caso das falhas de empurrão descritas na região do complexo Cuiabá-Lamego (Ribeiro-Rodrigues, 1998).

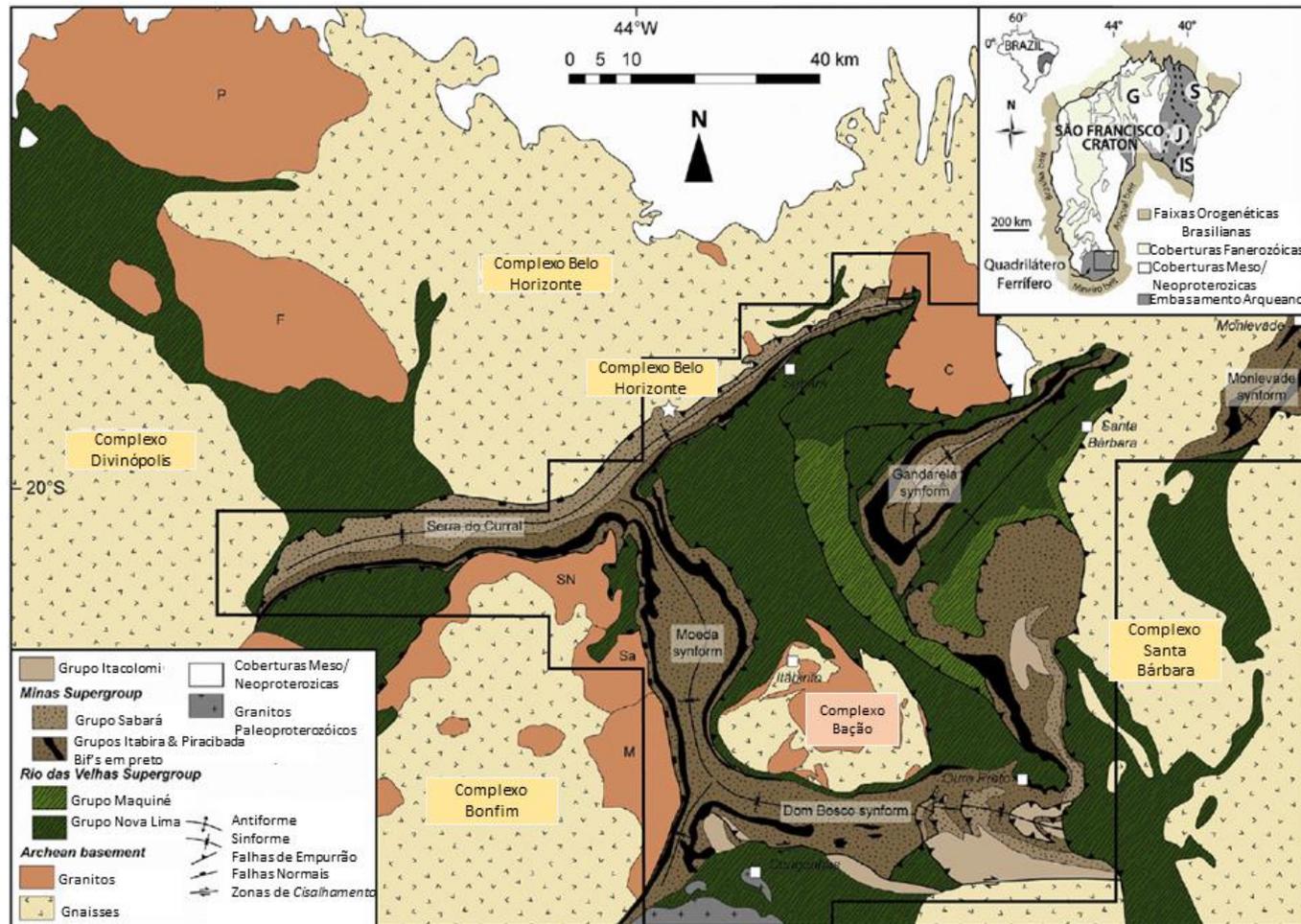


Figure 1.5 – Geologia Regional do Quadrilátero Ferrífero. Abreviações de batólitos e plútons: C- Domo de Caeté, F- Florestal, M-Mamona, P-Pequi, As-Samambaia, SN-Sousa-Noschese. Inset: Desenho esquemático do Cráton São Francisco mostrando a localização das faixas orogênicas brasileiras que o bordejam, bem como o Cinturão Mineiro. Abreviações: G, J, IS e S são os blocos Gavião, Jequié, Itabuna-Salvador-Curaça e Blocos Serrinha, respectivamente (Farina et al., 2015).

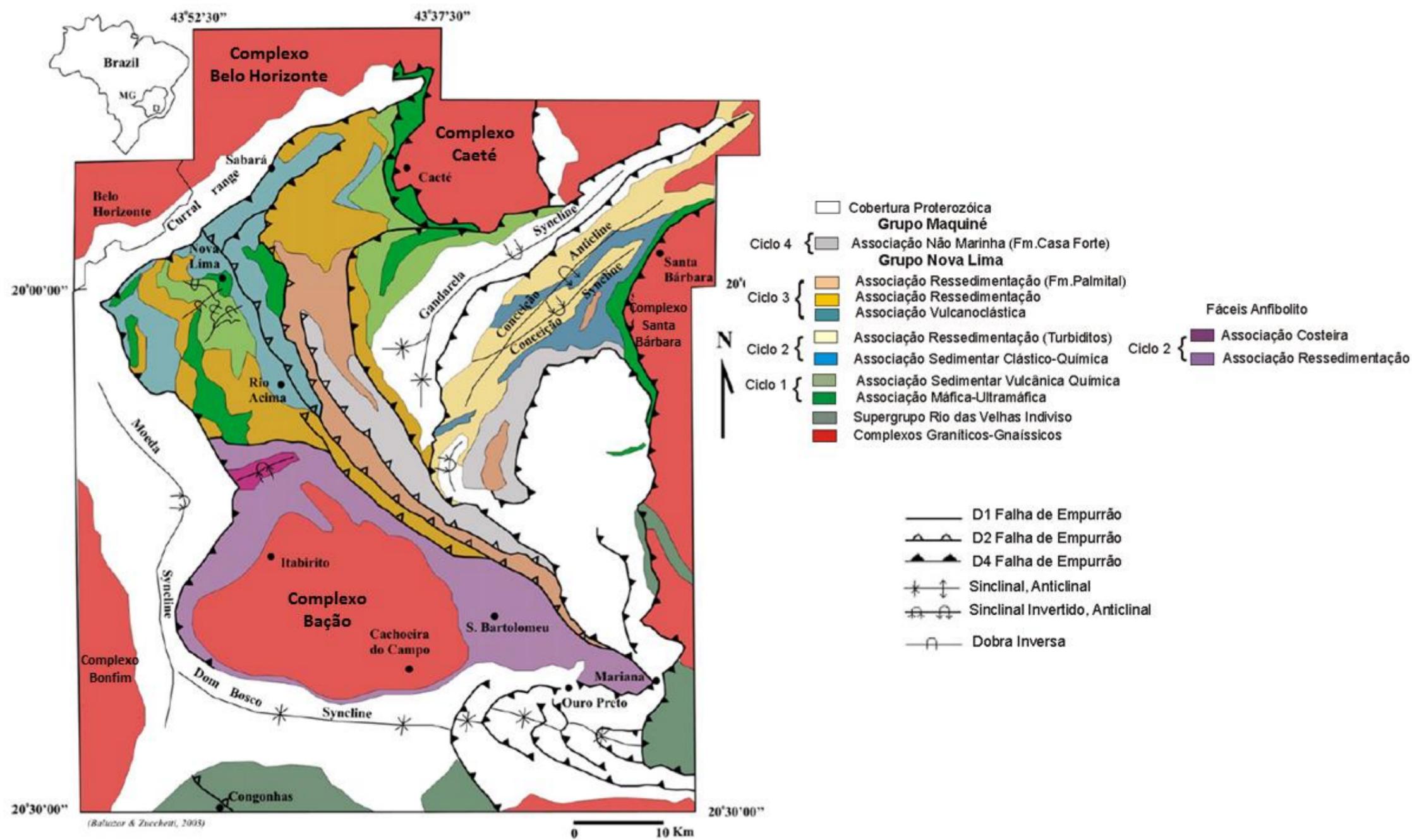


Figura 1.5 – Geologia simplificada do Rio das Velhas segundo Baltazar & Zuchetti (2007).

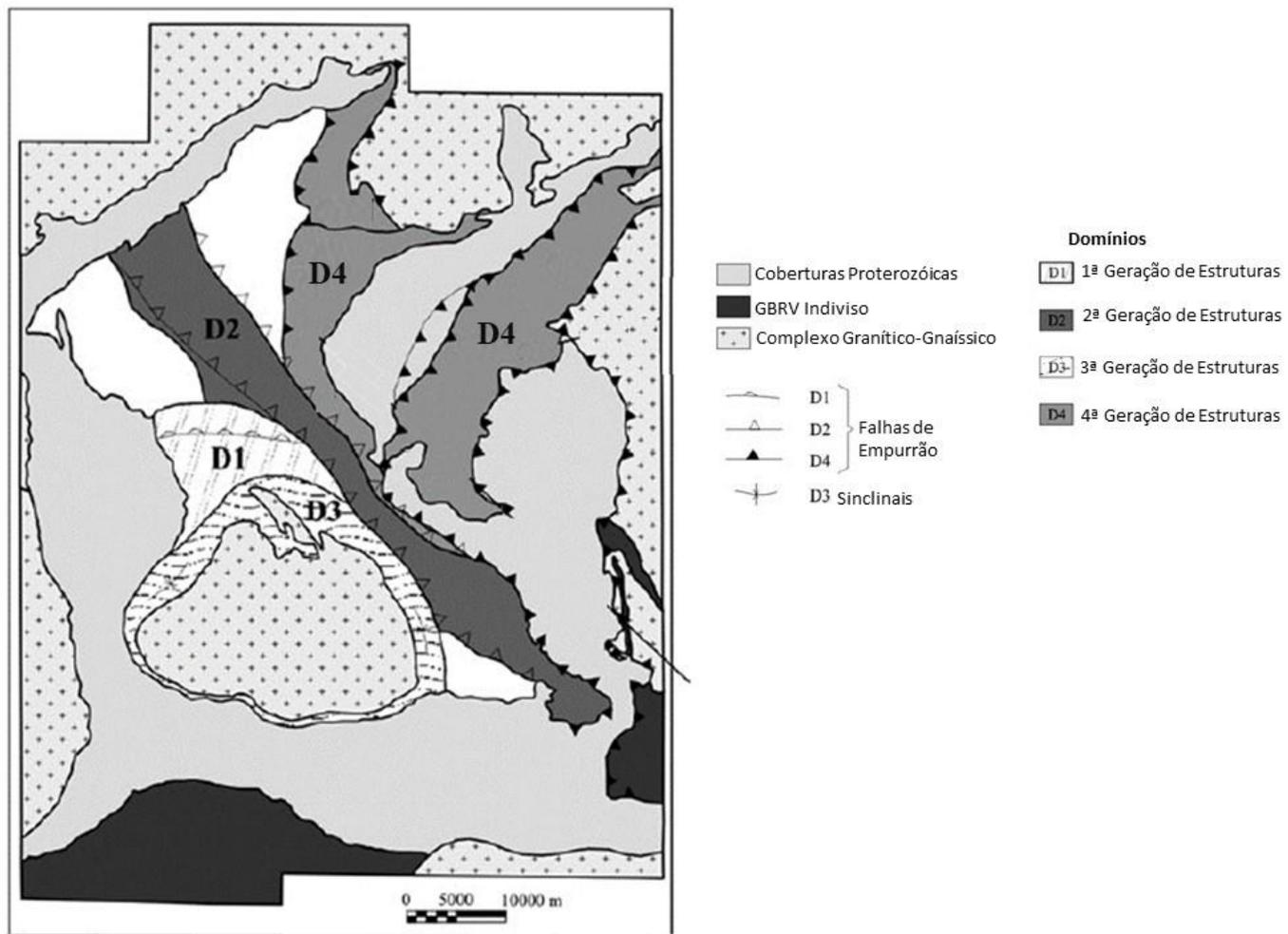


Figura 1.6 –Domínios Tectônicos segundo Baltazar & Zuchetti (2007).

1.7.3 Coberturas sedimentares plataformais

O terceiro domínio do QF corresponde às sequências metassedimentares paleoproterozoicas do Supergrupo Minas (SGM) e do Grupo Itacolomi (Dorr, 1969). O SGM é dividido em quatro grupos: Grupo Caraça, unidade basal clástica; Grupo Itabira, unidade química intermediária composta por espessas formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior e dolomitos; Grupo Piracicaba, unidade clástica; e Grupo Sabará, unidade sedimentar *sin-orogênica* associada ao evento transamazônico (Renger *et al.*, 1994).

A idade para deposição do SGM é balizada entre 2.650 e 2.420 Ma. A primeira idade foi obtida em zircões detríticos da Formação Moeda do Grupo Caraça (Renger *et al.*, 1994), e a segunda refere-se à idade de sedimentação do topo da Formação Gandarela do Grupo Itabira (Babinski *et al.*, 1995).

1.7.4 Metamorfismo

No QF, quatro eventos metamórficos são reconhecidos. O primeiro é arqueano de alto grau metamórfico com migmatização, a qual afetou o embasamento granito-gnáissico, com uma idade de $2.860^{+14/-10}$ Ma e 2.772 ± 6 Ma (Noce *et al.*, 1998). Lana *et al.* (2013) sugerem esse mesmo intervalo (2.800 e 2.770 Ma) para o registro do magmatismo e metamorfismo nas fácies anfíbolito de toda a porção sul do Cráton São Francisco. O segundo evento afetou o Supergrupo Rio das Velhas (SGRV) e apresenta um pico metamórfico em fácies xisto verde e um gradual aumento para fácies anfíbolito baixo, à leste do QF. A sua idade é estimada em 2.700 Ma (Herz, 1970, 1978) *in* Noce (2000). O terceiro evento ocorreu na Orogenia Transamazônica e também afetou o SGRV. O grau metamórfico é de fácies xisto verde, com idade estimada em 2.000 Ma (Ladeira *et al.*, 1983 *in* Ribeiro-Rodrigues, 1998). O quarto evento metamórfico corresponde à Orogenia Brasileira, o qual também afetou as rochas do GBRV em torno de 550-500 Ma, o que provocou metamorfismo em fácies xisto verde, conforme a datação de K-Ar em biotita (Cordani *et al.*, 1980 *in* Lobato *et al.*, 2001).

1.7.5 Mineralizações

Os principais depósitos auríferos no GBRV são regionalmente controlados por estruturas associadas às fases D2 e D4 correspondentes ao DOM 2 e DOM 4, com direções predominantemente NW/SE, NE/SW e E-W.

As mineralizações são consideradas epigenéticas e relacionadas ao enriquecimento de sulfetos nas rochas encaixantes (Lobato *et al.*, 2001). Entre as principais rochas hospedeiras, incluem-se: os BIFs, responsável por boa parte da produção de ouro no GBRV (minas de Cuiabá, Pilar, São Bento, Lamego e Raposos); a lapa seca, que é uma rocha hidrotermalizada rica em carbonato, quartzo, sericita e albita existente nas minas de Morro Velho, Bela Fama e Bicalho (Lobato *et al.*, 2001); as rochas máficas e ultramáficas (Juca Vieira, Cuiabá); e as vulcanoclásticas (Córrego do Sítio).

Os principais depósitos são representados figura 1.3, destacando-se: Morro Velho, Cuiabá, Raposos, São Bento, Faria, Bicalho, Bela Fama, Córrego do Sítio, Urubu, Lamego e Santa Quitéria. A alteração hidrotermal associada a mineralização é pervasiva e relaciona-se a zonas de cisalhamento geradas em D2 e D4. Essa alteração é caracterizada por intensa silicificação, carbonatação, sericitização e cloritização (Vieira & Oliveira, 1988 *in* Lobato *et al.*, 2001). Os corpos de minério sulfetados são maciços, bandados ou disseminados e sempre associados aos veios de quartzo (Lobato *et al.*, 1998). A mineralização é considerada arqueana, com idade U-Pb de $2,67 \pm 0,014$ Ga em rochas dos depósitos Cuiabá e Morro Velho, relacionada aos estágios mais tardios da evolução do *Greenstone Belt* Rio das Velhas (Lobato *et al.*, 2007).

2 O conceito de sistemas minerais e sua aplicação na seleção de áreas potenciais para exploração mineral

A abordagem de sistemas minerais aplicada à exploração nasceu em meados de 1970, em função das taxas de insucesso da indústria petrolífera. Após duas décadas, Magoon & Down (1994) consolidaram o conceito ao aplicá-lo na exploração petrolífera como forma de quantificação e análise de risco. Paralelamente, Wylborn *et al.* (1994), ao introduzir o mesmo conceito para indústria da mineração, apresentam os componentes principais dos sistemas proterozoicos na Austrália.

Os modelos de prospectividade mineral baseados em SM objetivam mapear os vestígios ou rastros de diversos processos geológicos que interagem entre si e com o contexto regional. Assim, a escala de apresentação dos dados torna-se um elemento importante no entendimento dos processos envolvidos na formação dos depósitos minerais. Dessa maneira, ao elaborar mapas preditivos com foco na exploração mineral, essa abordagem permite um melhor exercício no processo de tomada de decisão, pois é possível traçar diferentes estratégias nas diferentes escalas de uma pesquisa exploratória.

2.1 O conceito de sistemas minerais (SM)

A análise baseada em sistema é o entendimento da combinação dos processos geológicos envolvidos desde a formação até a preservação de um depósito mineral em todas as suas escalas, incluindo processos envolvidos na mobilização a partir da fonte, do transporte, da acumulação e da preservação durante a subsequente história geológica. Várias vertentes das geociências começaram a utilizar a abordagem de Sistema Mineral, aplicando-a no estudo de tipos de depósitos minerais específicos (ex.: Hagemann & Cassidy, 2000; Pirajno, 2009; Hagemann *et al.*, 2016), na seleção de alvos exploratórios (McCuaig *et al.*, 2010) e na análise econômica de depósitos (Kreuzer *et al.*, 2008). Na prática, essas vertentes convergem entre si e o objetivo principal é alcançar as melhores chances de sucesso exploratório para o depósito pesquisado.

A aplicação do sistema mineral na Geologia Econômica refere-se à reinterpretção dos modelos metalogenéticos vigentes em esquemas de classificação. Nessa óptica, depósitos minerais formados por processos geológicos semelhantes, mesmo que contenham variações, são agrupados em um único modelo. McCuaig &

Hronsky (2014) ressaltam que modelos de depósito, como aqueles do tipo *Carlin*, descrevem processos geológicos intrínsecos à escala de detalhe e são de difícil reconhecimento em escalas regionais, pois são elaborados observando-se características na escala de depósito. Hagemann *et al.* (2016) classificam todo o espectro de depósitos em: sistemas sedimentares, hidrotermais e ortomagmáticos. Esse é um esquema de classificação fundamentado em descrições genéricas dos depósitos com o foco em processos tectônico-metalogenéticos em grandes escalas. Os SM sedimentares são dominados por processos geológicos de baixa temperatura, que ocorrem próximos à superfície, citam-se, como exemplos, depósitos: fosforitos, urânio sedimentar, entre outros. Sistemas minerais ortomagmáticos são os que contêm metais na forma de sulfetos, óxidos e que se cristalizaram, de forma genérica, em magmas máficos e ultramáficos. Exemplos desses depósitos são os Ni-Cu-PGE, associados em Komatiitos, Ni-Cu e PGE sulfetado em intrusões acamadadas. Os sistemas hidrotermais, por sua vez, incluem os pórfiros (Cu-Au-Mo pórfiro), epitermais, orogênicos, IOCG, VMS, MVT e os Cu e Zn-Pb hospedados em rochas sedimentares, denominados de *sediment hosted*. Para os três esquemas, os autores descrevem os processos que são comuns para a formação de uma mineralização, agrupando-os nos componentes do sistema: fonte, migração (*pathway*), trapas e dispersão geoquímica.

Os artigos publicados por Barnicoat (2007) e McCuiag *et al.*, (2010) sacramentam a aplicação do SM nas geotecnologias, principalmente com o trabalho intitulado *Translating the mineral system understanding into an effective exploration targeting system*. Os modelos exploratórios baseados em SM possuem um foco exploratório mais amplo em termos de escala e por esse motivo são considerados mais “preditivos” (Porwal & Kreuzer, 2010). Os processos mineralizantes se iniciam na astenosfera, fornecendo a fonte de calor, fluidos e metais, que são transportados até a crosta e concentrados economicamente em vários tipos de depósitos (Figura 2.1). O resultado de todos os processos geológicos responsáveis pela formação do depósito é a assinatura (*footprint*) da mineralização e pode ser identificado em diversas escalas (Knox-Robinson & Wylborn, 1997; Yun *et al.*, 1998; Groves *et al.*, 2000; Hodkiewicz *et al.*, 2005).

Ainda nesse contexto, as geotecnologias auxiliam no mapeamento indireto por meio de dados geológicos, geoquímicos, geofísicos, de sensoriamento remoto onde mapeiam os elementos que compõem o SM. Essas respostas podem ser reforçadas com

a criação de mapas prospectivos, utilizando-se os sistemas de informação geográfica (SIG). Com isso, a aplicação do conceito de sistemas em conjunto com as ferramentas de análise espacial imprimiu uma nova dinâmica à exploração mineral (Porwal & Carranza, 2015). Modelos prospectivos, como os dirigidos pelos dados ou pelo conhecimento (Bonham-Carter, 1994), eram utilizados separadamente e começam a ser integrados de forma conjunta (Porwal & Carranza, 2015).

A aplicação do conceito de SM na análise econômica é utilizada, principalmente, para o cálculo de valorização de áreas e análise de risco exploratório. Não há muitos trabalhos desenvolvidos nessa linha, os principais autores são Lord *et al.* (2001) e Kreuzer *et al.* (2008). Eles propuseram um modelo baseado em probabilidade para medir a taxa sucesso na exploração com base na incerteza geológica. Esse método será melhor abordado no tópico de Avaliação Econômica.

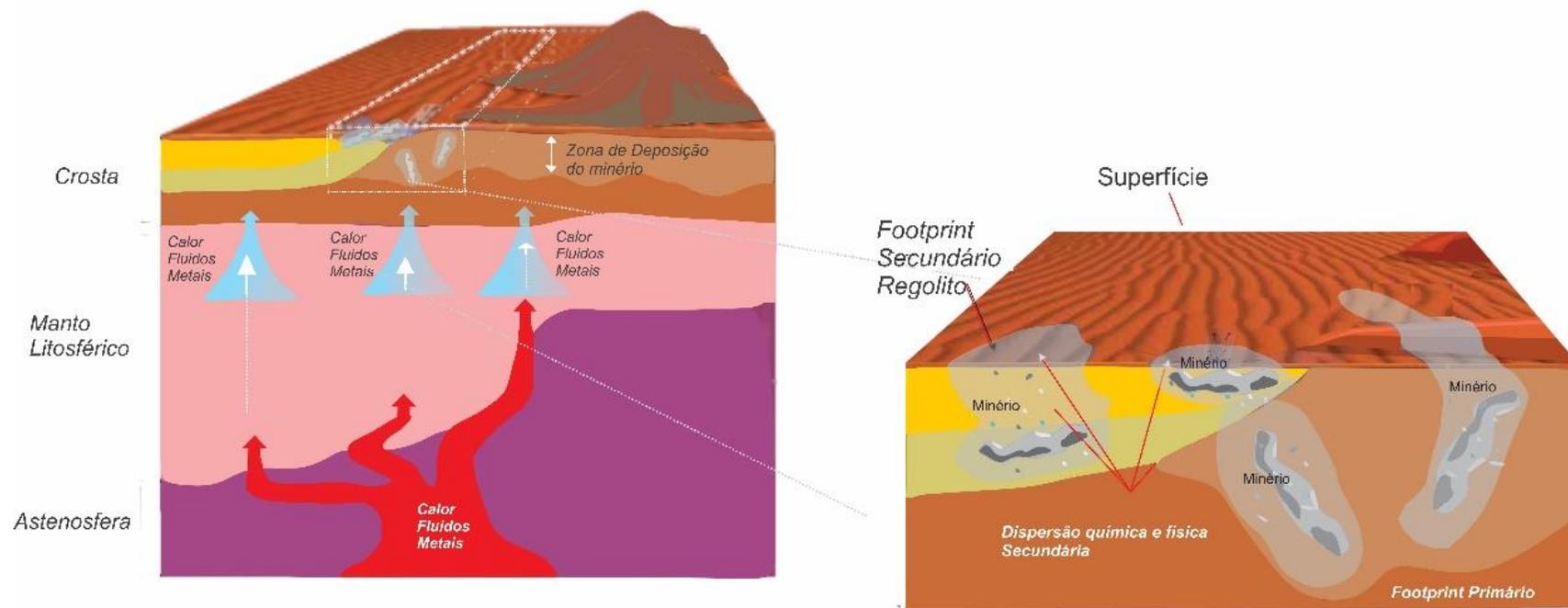


Figura 2.1 – Componentes de um sistema mineral e footprint de um depósito como resultado de processos geológicos em várias escalas – (Australian Academy of Science, 2012).

2.2 Definição dos principais elementos e componentes de um sistema mineral

Um importante aspecto desta abordagem é o reconhecimento de que um depósito é uma parte de um sistema mineralizante maior. Em escala litosférica, a formação de um depósito depende da atuação de quatro elementos críticos (McCuaig & Hronsky, 2014): fertilidade, transição geodinâmica, arquitetura favorável da litosfera e as condições para preservação do depósito (Figura 2.2). Em outras escalas, como província, distrito e depósito, esses elementos desmembram-se em vários componentes e são simplificados nesta tese em quatro (Figura 2.3): fonte, migração (*pathway*), trapas e dispersão geoquímica (Hagemann *et al.*, 2016).

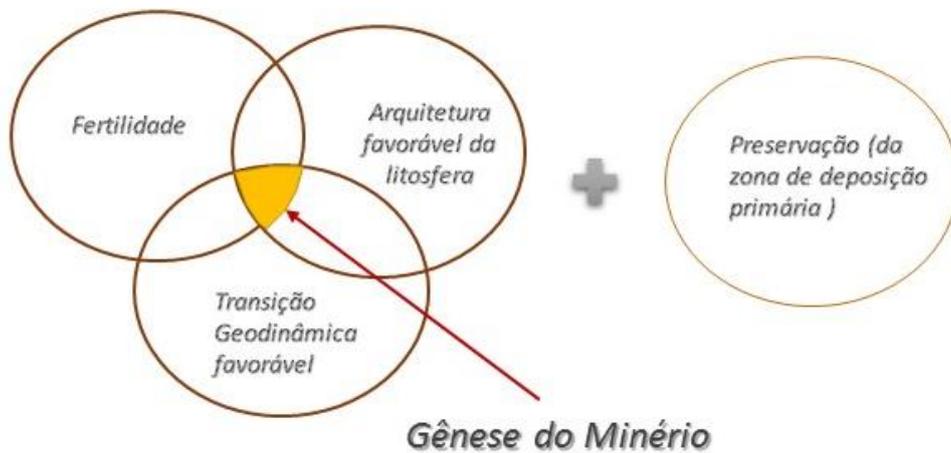


Figura 2.2 - Elementos críticos de um Sistema Mineral segundo McCuaig & Hronsky (2014).

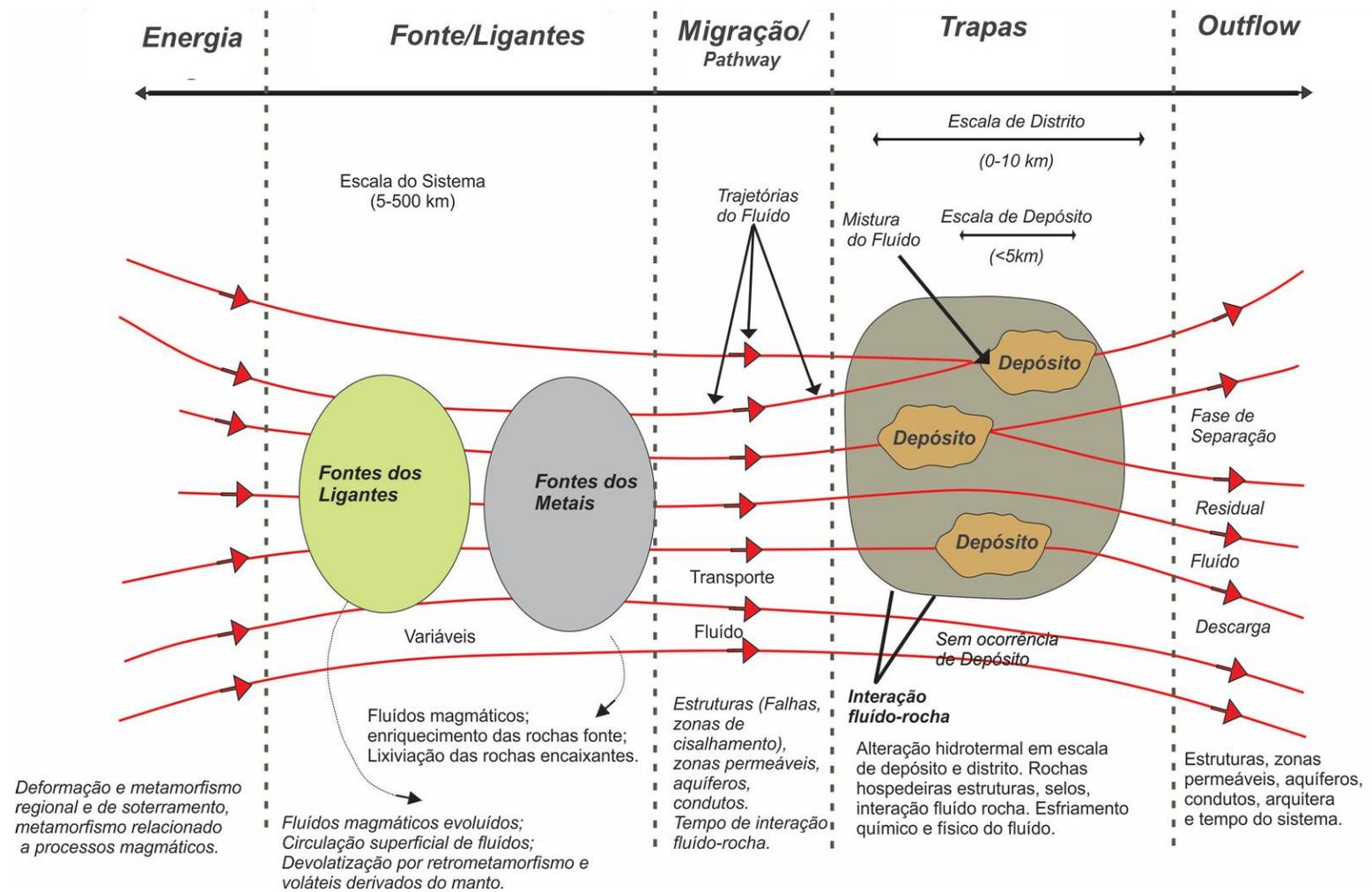


Figura 2.3 – Diagrama Esquemático de um Sistema Mineral exemplificando os componentes de um sistema hidrotermal de formação de um depósito mineral (Modificado de Hagemann & Cassidy, 2000, Hagemann et al., 2016).

O processo para formação de um depósito, na ótica da abordagem de SM, inicia com a atuação de eventos tectônicos que definem uma janela temporal. Eles são a transição geodinâmica favorável (McCuaig *et al.*, 2010) ou desencadeadores (*triggers*) (Hagemann *et al.*, 2016), fornecendo a energia necessária para geração de fluidos que irão atuar na fertilidade de uma região. Essa fertilidade, também chamada de região fonte ou fonte, é definida como a tendência de uma região ser melhor dotada para concentração de metais, quando comparada a outros ambientes equivalentes (*endowment*). Os fluidos são transportados através de grandes lineamentos (estruturas de 1ª ordem), que formam a arquitetura favorável derivada ou reativada por processos tectônicos. Essas estruturas, também chamadas de *pathway*, constituem as trajetórias ao longo das quais os fluidos migram e se tornam persistentes em uma ou mais direções, incluindo zonas heterogêneas.

No transporte do fluido, ocorre a desestabilização de complexos (ligantes) que resultam da deposição do metal. Isso se dá em função de mudanças físico-químicas, por exemplo, queda de pressão, resfriamento (*cooling*) ou rápida interação fluido-rocha, que equilibram o transporte (McCuiag & Kerrich, 1998). Os processos que dirigem esses fluidos são chamados de *drivers*. O mecanismo que concentra o fluxo de fluido até o local de deposição é denominado de regulador de pressão (*throttle*) e o local onde esse fluido é aprisionado chama-se trapas. Todo esse processo que envolve a atuação dos *drivers*, *throttllle* e trapas (Hagmann *et al.*, 2015) é denominado de zona primária de deposição e conservação do metal (McCuiag & Hronsky, 2014) e ocorre a partir da escala de distrito (*camp ou district scale*).

Por fim, a dispersão geoquímica (*dispersion/outflow*) compreende os processos geoquímicos que sucedem a deposição e resultam em feições geoquímicas e geofísicas passíveis de detecção por métodos indiretos.

De maneira esquemática, a figura 2.4 simboliza a organização dos elementos críticos (fertilidade, transição geodinâmica, arquitetura favorável) e dos componentes que constituem um sistema mineral. A região fonte ou fonte, em escala regional, é representada pela região primária onde uma certa concentração de metais é considerada, porém distribuída em grande volume de rocha. Para que haja uma concentração anômala, é preciso que ocorra o transporte e a preservação desses elementos para um menor volume de rocha (reservatório) em escala de distrito. Assim, é necessário que o

transporte seja capaz de carrear grandes volumes de massa. Esses fluidos são, em geral, magma ou fluido hidrotermal. O passo seguinte é aprisionar esse fluido (barreira) em trapas, sejam elas estratigráficas, litológicas ou estruturais. Por último, pode haver uma dissipação desse fluido através de condutos pré-existentes (fraturas, veios e outras estruturas). Alguns desses processos deixam registros, eles podem ser mapeados e integrados, em diferentes escalas, a partir de dados espaciais geológicos, geoquímicos, geocronológicos, geofísicos e de sensores remotos. Todas essas observações podem auxiliar, de uma forma indireta, para o entendimento da arquitetura de um certo sistema.

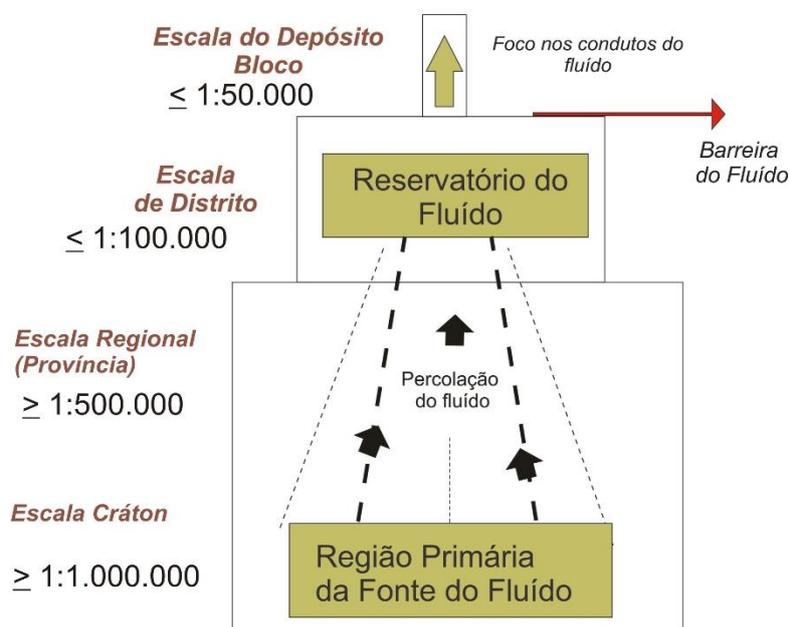


Figura 2.4 – Modelo esquemático de organização de um Sistema Mineral [modificado de McCuaig et al., (2014)].

2.3 A construção de modelos de favorabilidade utilizando sistemas minerais

O conceito de depósitos minerais refere-se à acumulação ou concentração de substâncias ou elementos que estão distribuídos escassamente na crosta terrestre, os quais incluem depósitos, ocorrências e prospectos minerais (Bateman, 1951). O termo mineralização refere-se aos processos geológicos coletivos que culminam na formação de depósitos ou mineralizações. O potencial mineral descreve a possibilidade da presença de um depósito ou mineralização (Porwal, 2006).

Os mapas de prospectividade mineral baseiam-se nas feições geológicas e nas suas relações espaciais com os alvos exploratórios. Essas relações são reconhecidas por meio de critérios que indicam os vários processos genéticos atuantes na formação de um depósito. Esses critérios, às vezes, são diretamente observados e, em outras, são inferidos. Eles são realçados nos processamentos de dados e combinados em mapas prospectivos (Porwal, 2006).

Dessa maneira, o objetivo da análise e da integração de dados é entender as relações espaciais dessas anomalias com depósitos e ocorrências minerais, processo conhecido como *predictive modelling* (Carranza, 2009). A seguir, são descritos alguns tipos de modelagem e a elaboração dos modelos baseados em sistemas.

2.3.1 – Tipo de modelagens

Os mapas de prospectividade mineral mostram uma distribuição geográfica de possíveis áreas potenciais de depósitos ou mineralizações (Porwal, 2006). Um modelo é uma representação simplificada (usualmente matemática) de eventos ou sistemas complexos. Na definição de Carranza (2009), modelos de favorabilidade ou mapas são descrições, representações ou predições de observações indiretas de sistemas ou eventos complexos, por meio de análise qualitativa ou quantitativa. A elaboração destes modelos envolve: alvo de interesse, por exemplo, prospecto; seu comportamento (presença ou ausência da feição); observações indiretas de um sistema ou de eventos (ex.: mineralizações); e o número de variáveis preditivas. Dessa maneira, a modelagem baseia-se nas inter-relações dessas variações e revela padrões de seus alvos e das variáveis.

Um modelo de prospectividade mineral deve se ajustar a um modelo de depósito (Carranza, 2009). A modelagem do mapa prospectivo segue etapas específicas, conforme indicado na figura 2.5. Inicia-se com a definição de um modelo conceitual

para o tipo de depósito a ser prospectado. Esse modelo é descritivo ao invés de preditivo e especifica em palavras ou diagramas as relações teóricas entre diversos controles ou processos geológicos (Carranza, 2009).

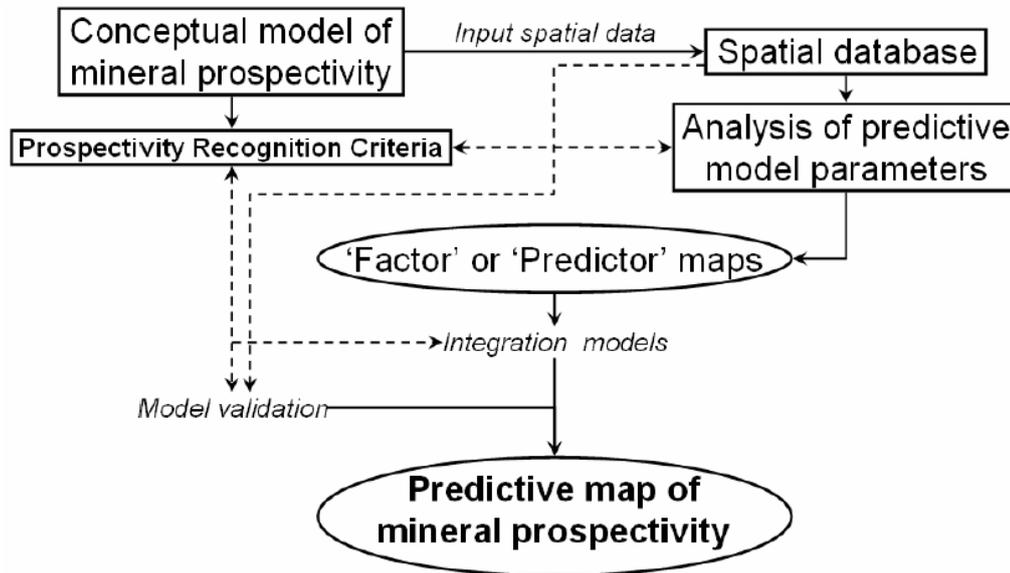


Figura 2.5 – Elementos de um modelo de prospectividade mineral (Modificado de Carranza, 2009)

Os modelos preditivos categorizam-se em mecanicistas (manuais) e empíricos (foco deste trabalho), além de um híbrido entre os dois (Harbaugh & Boham-Carter, 1970). Modelos mecanicistas equivalem à modelagem teórica. Baseia-se em equações matemáticas, as quais descrevem as interações de processos que controlam o comportamento de sistemas ou eventos. A modelagem empírica é apropriada, por exemplo, quando processos químicos ou físicos que controlam o comportamento do sistema de interesse são insuficientemente conhecidos ou indiretos. A interação de processos não é considerada no modelo em um sentido matemático como na modelagem mecanicista. Em contrapartida, ele quantifica a influência de um ou mais processos no comportamento do sistema por meio de equações empíricas. Modelagem empírica é, portanto, equivalente à modelagem simbólica e, geralmente, segue uma abordagem indutiva. As equações em modelagem empírica são construídas de modo a definir as relações entre a variável de interesse e um número de variáveis preditivas, as quais representam os processos. Descrevem ou simbolizam o observado ou o comportamento previsto do sistema de interesse.

Existem dois tipos de modelos empíricos, os qualitativos e os quantitativos, que foram definidos por Bonham-Carter, (1994). O primeiro engloba as técnicas denominadas de *knowledge-driven*, guiada pelo conhecimento; o segundo é também conhecido como *data-driven*, dirigida pelos dados. O método *data-driven* inclui: pesos de evidência, regressão logística e redes neurais, ele é utilizado em áreas com uma grande coleção de dados disponíveis e com relativo número de alvos exploratórios, ou seja, áreas metalogeneticamente maduras. O método *knowledge-driven* (lógica *fuzzy*) é empregado em situações de poucos alvos exploratórios e de pouca informação, mas também pode ser utilizado em áreas maduras quando há um conhecimento maior dos componentes da mineralização.

Um dos métodos mais utilizados na modelagem é a lógica *fuzzy* e o peso de evidência. Pode-se optar, portanto, investigar os resultados de um evento provável, ou seja, determinar se um evento ocorreu ou não (Peso de evidência); ou explorar o grau de aleatoriedade, descrevendo a incerteza em que esse evento ocorreu (Lógica Fuzzy). Nesta pesquisa, optou-se por estudar a incerteza em que os processos mineralizantes ocorreram, ao invés de investigar se determinado depósito (evento) ocorre ou não na área de estudo em função de um conjunto de dados. Assim, a escolha da lógica *fuzzy* é mais adequada, uma vez que a incerteza resultante dos modelos podem ser associada aos estágios iniciais da exploração mineral.

2.3.2 Novo cenário para geração de modelos de potencialidade mineral

Com a adoção do conceito baseado em SM de Wylborn *et al.*, (1994), esses métodos de modelagem (*data-driven e knowledge-driven*) recebem outro foco. De acordo com Lisitsin (2015), essas análises apresentam diferentes objetivos e vantagens conforme seu uso na exploração mineral (Tabela 2.1). Com a adoção do conceito de SM, os modelos espaciais passam a ser empregados de forma conjunta (híbrida) e em, pelo menos, três escalas: regional (província ou cráton), distrital e depósito.

A abordagem de SM será empregada no Quadrilátero Ferrífero aplicando-se o método de modelagem guiada pelo conhecimento, por meio da lógica *fuzzy*. Essa escolha baseou-se na possibilidade de integrar a análise espacial e os métodos de valoração econômica no processo de tomada de decisão.

Nos próximos tópicos, serão apresentados um breve histórico sobre SM, as ferramentas de análise de investimento e como esses dois tipos de análises podem se complementar no processo de tomada de decisão.

Tabela 2.1 - Métodos de Análise Espacial a serem utilizados nesta tese (Bonham-Carter, 1994; Silva, 1999, Kreuzer et al., 2010; Lisitsin, 2015).

	Método		Objetivo	Vantagens e Desvantagens
Mapa de Potencial Mineral	<i>Knowledge-Driven</i>	Lógica <i>Fuzzy</i>	1-Seleciona alvos exploratórios; 2-Avalia a incerteza dos mapas de favorabilidade mineral.	Apresenta um bom entendimento de fatores prospectivos em áreas desconhecidas. Contudo, é qualitativo.
	<i>Data-Driven</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Peso de evidência ✓ Regressão lógica ✓ Redes neurais 	Quantificar o potencial mineral em grandes escalas.	Aplicado em províncias Maduras
Mapa de Potencial Mineral baseado em Sistemas Minerai Multiescalas Multiestágios	<i>Knowledge-Driven</i>	Lógica <i>Fuzzy</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revisão do Processo de formação dos depósitos minerai; ✓ Integração, interpretação e guia para outros métodos. 	Essencial para minimizar a tendência de outros métodos exploratórios. É elaborado em várias escalas.

2.4 A aplicação dos conceitos de sistemas minerais no estudo das mineralizações auríferas hospedadas em *greenstone belts*

Pirajno (2009) classifica como sistemas hidrotermais, as mineralizações auríferas associadas ao contexto de *greenstone belts*. Nessa categoria, inserem-se os depósitos auríferos do tipo *lode gold*, que variam em idade do neógeno ao paleoarqueano, que se encontram hospedados em terrenos *granite-greenstone belts* (GB). O termo *lode*, primeiramente utilizado em referência a um espectro de características morfológicas em depósitos tipicamente arqueanos (Colvine *et al.*, 1984), hoje é empregado como sinônimo de depósitos auríferos orogênicos, depósitos mesotermiais auríferos, depósitos auríferos metamórficos controlados por estruturas (Groves *et al.*, 1998).

Nesta tese, entendem-se como depósitos auríferos orogênicos aqueles relacionados às zonas de fechamento orogênico, não necessariamente arqueanas ou terrenos *granite-greenstone-belts*. Ambientes orogênicos estão relacionados às zonas de convergência de placas e regimes de *stress* compressivos (Groves *et al.*, 1998).

Anteriormente à classificação proposta por Groves *et al.*, (1998), os depósitos eram conhecidos apenas como mesotermiais. Segundo Lindgreen (1933) *apud* Groves *et al.*, (1998), esses depósitos formavam-se em uma profundidade de 1.2 a 3.6 km. Contudo, essa classificação não incluía as faixas de variação de pressão (1.0 a 3.0 kbar) e de temperaturas (300 o a 400°C). Dessa maneira, Groves *et al.* (1998) redefine o conceito de depósitos de ouro orogênico. Os autores englobam todos os depósitos formados durante os processos de deformação compressional e transpressional, os quais encontraram-se envolvidos em margens de placas convergentes em ambientes de orogenia acrescionária ou colisional (Figura 2.6 A e B).

Estudos demonstram uma relação entre os grandes eventos de evolução de crosta continental e as atividades de plumas mantélicas, bem como sua influência no ciclo de supercontinentes (Groves *et al.*, 2005). Segundo os autores, a transição da tectônica do arqueano para o estilo de placas tectônicas modernas teria sido influenciada pela ação de plumas mantélicas e isso explica as variações seculares de eventos metalogenéticos em termos de processos tectônicos. O período entre 2.7 a 2.6 Ga é marcado por intenso crescimento de crosta continental juvenil (Figura 2.7 A), o qual também se sobrepõe com o intervalo de eventos de plumas mantélicas entre 2.7 a 2.5 (Figura 2.7 B). Comparando esses eventos às idades de depósitos auríferos orogênicos (Figura 2.9),

esse período é sistematicamente marcado pela ocorrência de depósitos gigantes e do tipo *world class* (Groves *et al.*, 2005). No Brasil, a Província Metalogênica do Quadrilátero Ferrífero representa um importante *endowment* para depósitos auríferos orogênicos de idade arqueana, enquadrando-se em vários aspectos abordados por Groves *et al.*, (2005), e constitui uma área-chave para testar o método sugerido neste trabalho.

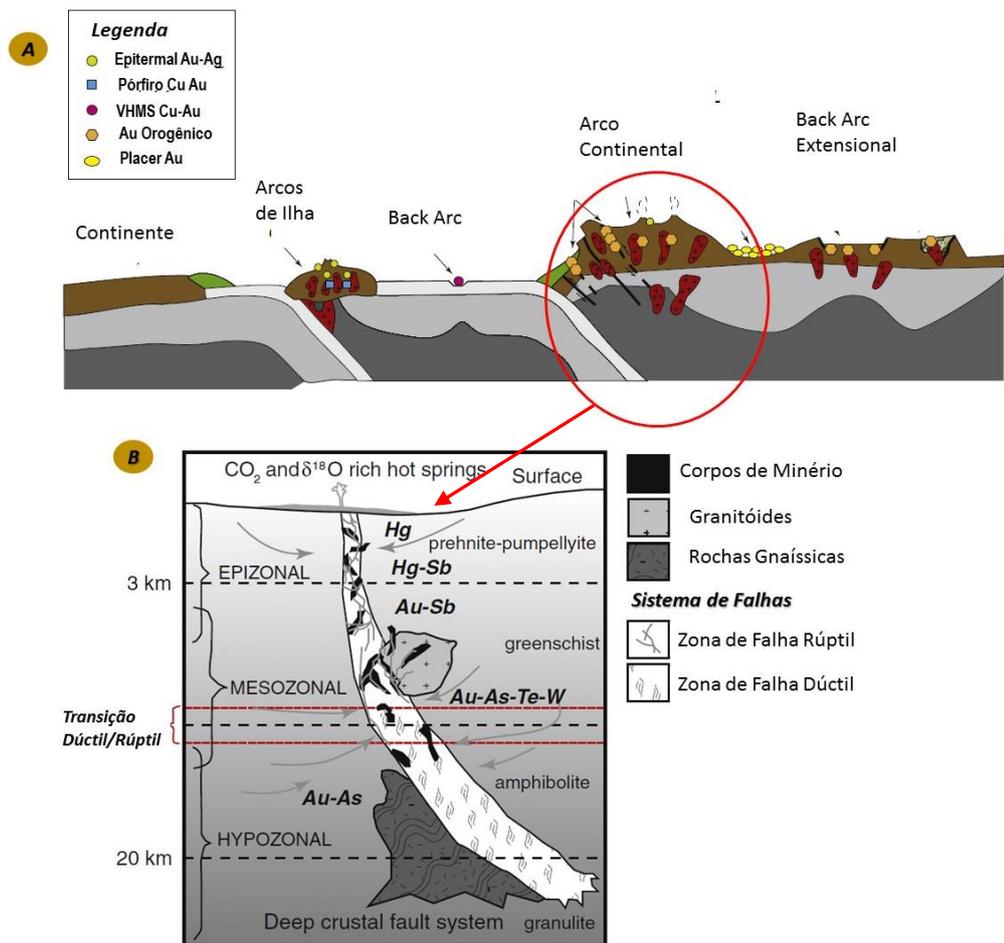
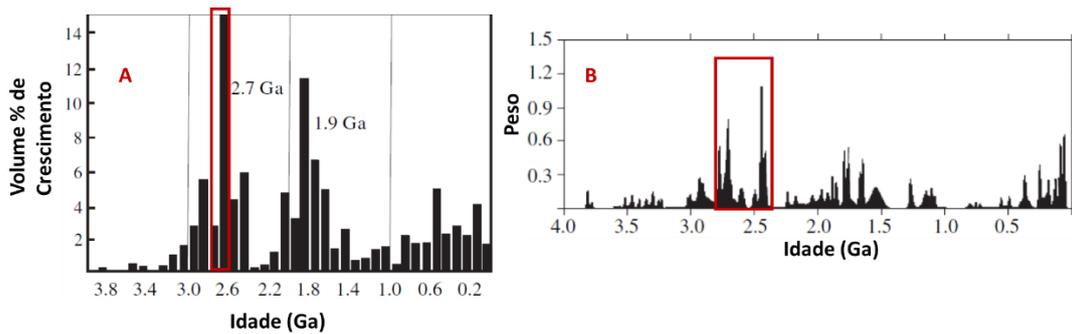


Figura 2.6 – A) Depósitos auríferos associados a diferentes ambientes tectônicos. O ouro orogênico se forma na colisão ou acreção continental (Groves *et al.*, 1998) B) Níveis de profundidade para formação de depósitos em ambiente compressional/transpressional.



–**Figura 2.7** – Em A) Frequência de evolução da crosta continental juvenil. Em B) – a distribuição de eventos de plumas mantélicas. Observar as idades entre 2.7 a 2.5 Ga destacadas em vermelho (Groves et al., 2005).

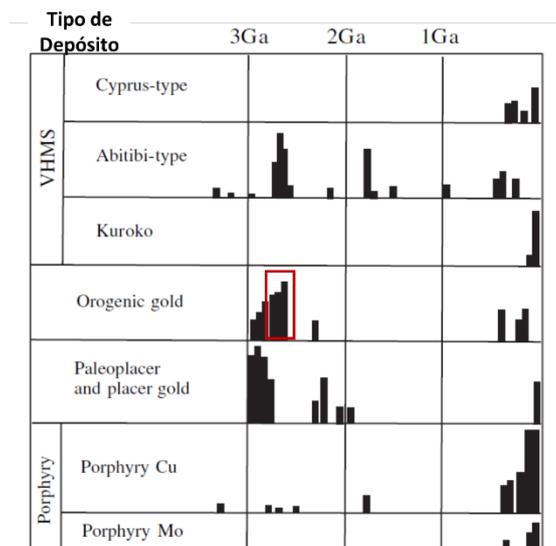


Figura 2.7 B- Distribuição de depósitos no tempo geológico em ambientes orogênico em margens convergentes. Observar os depósitos auríferos orogênicos destacados pelo retângulo em vermelho (Groves et al., 2005).

2.4.1 Fonte e natureza do fluido

Na perspectiva de SM, há uma ênfase nos processos relacionados à geração dos fluidos. Os sistemas orogênicos hidrotermais formam-se nos estágios tectônicos convergentes, colisionais a pós-colisionais. Foster (1990) descreve, a partir da revisão de vários autores, que, nos modelos de ouro orogênico, o ouro é mobilizado em resposta ao metamorfismo regional.

Phillips & Powell (2009) testam um modelo de metamorfismo contínuo para explicar, também, depósitos orogênicos hospedados em sequências metamórficas com grau metamórfico mais elevado, uma vez que esse modelo tem sido considerado o melhor cenário para explicar a origem de depósitos do tipo *only gold*, como é o caso dos depósitos orogênicos. Segundo os autores, os primeiros processos estão relacionados ao

metamorfismo de assoalho oceânico que ditam a composição de rochas no início do metamorfismo regional, especialmente os seus voláteis, como exemplo, o conteúdo de CO_2 (Figura 2.8A). Rochas em condições anídras se devolatizam com o aumento progressivo da temperatura, e perdem H_2O , CO_2 e potencialmente H_2S . A preservação de assembleias de pico metamórfico em *greenstone belt* atesta o limite do retrometamorfismo. Os autores ressaltam também a idade da mineralização que provavelmente deve ser *sin* a pós-pico metamórfico (Figura 2.8B). A conclusão deste estudo é que os modelos envolvendo fluidos metamórficos melhor explicam a origem de depósitos orogênicos. O modelo contínuo postula que a distribuição, alteração, litologia e estruturas em depósitos auríferos são modificadas com a superposição do metamorfismo.

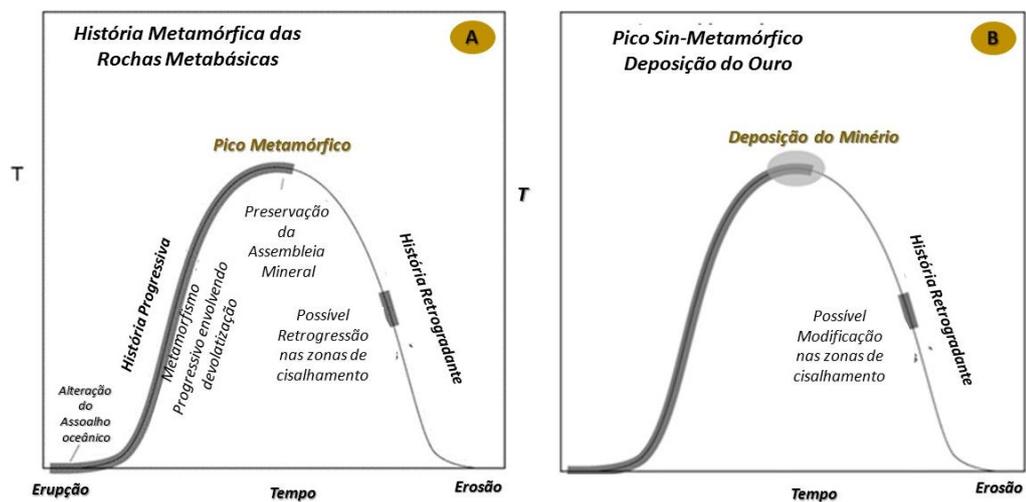


Figura 2.8– (A) Modelo que representa a história do metamorfismo regional em rochas máficas arqueanas sob a ação de processos que ocorrem no assoalho oceânico que ditam a composição do início do metamorfismo, especialmente o conteúdo de voláteis (CO_2). Em (B), pico sin-metamórfico da formação dos depósitos auríferos como postulado no modelo contínuo, ilustrando a ação da temperatura-tempo no processo de metamorfismo (Modificado de Phillips & Powell (2009).

O modelo metamórfico de Godfarb & Groves (2015) enfatiza os vários cenários associados à devolatização durante o metamorfismo regional, a partir de fontes mantélicas ou magmáticas (Figura 2.9). Em (A), está representado o aquecimento radiogênico e a inversão de sequências metamórficas *barrovianas* em áreas de espessamento crustal. Em (B), quando a pluma mantélica colide com a base da crosta, particularmente, nos tempos arqueanos, forma também estruturas extensionais. Na parte (C), o núcleo de complexos metamórficos desenvolvidos durante a subducção do tipo *rollback* e a ascensão da litosfera; em (D), aquecimento da base da crosta. Essa crosta

poderia conter sequências metamórficas regionais em *greenstone belts* e estar relacionada a episódios finais termiais.

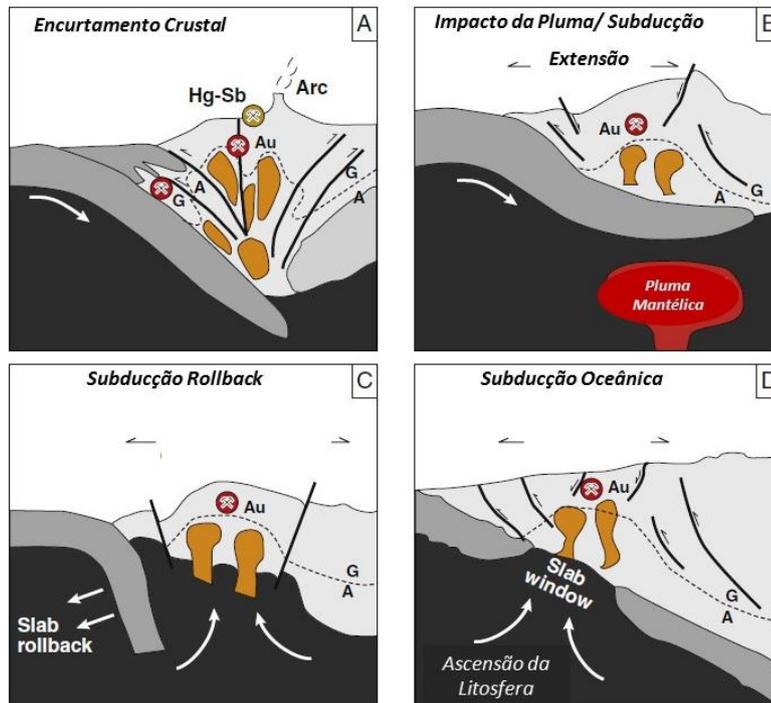


Figura 2.9 –Possíveis cenários relacionados à devolatilização de rochas ao longo de margens continentais, geração de fluidos e formação de mineralizações auríferas. A Linha pontilhada (A) representa o limite das fácies Anfíbolito e (G), Fácies Xisto Verdes. (Modificado de Goldfarb & Groves, 2015).

Com relação à mineralogia do minério, depósitos orogênicos são conhecidos como *only-gold* (Hodgson & MacGeehan, 1982 in Foster, 1990). Eles distinguem-se de outros depósitos que são enriquecidos em outros elementos metálicos, como Cu, Pb, Zn, Ag, por exemplo, Cu-Au em pórfiros ou depósitos epitermais ricos em Au tipo VMS. Os depósitos orogênicos arqueanos apresentam associações características de Au, com As, W, Ag, Sb, Te e B. Além disso, trazem teores baixos de metais-base e de Mo (Foster, 1990). A figura 2.10 apresenta o contraste entre o enriquecimento metálico em alguns grandes depósitos em comparação aos sulfetos maciços vulcanogênicos. Razões de prata/ouro são usualmente por volta de 1:1. Em alguns depósitos, no entanto, podem ser considerados o enriquecimento de um ou mais elementos de Sb, Cu, Pb, Mo e Ag.

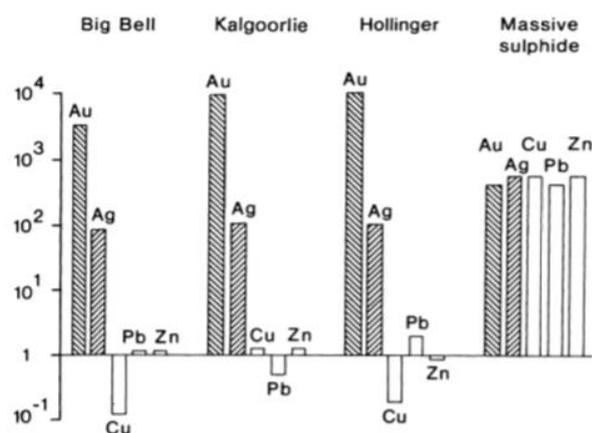


Figura 2.10 Comparação entre os fatores de enriquecimento para metais-base em depósitos Auríferos Arqueanos versus Depósitos de Sulfetos Maciços. (Groves & Barley, 1988 in Foster, 1990.)

A natureza dos fluidos é caracterizada por baixa salinidade (maior de que 12w% NaCl equivalente). Alto conteúdo de H₂O e C₂O (>4mol%), com menos volume de CH₄ e N₂ e próximo do pH neutro. O transporte do ouro é por complexos de enxofre. As condições deposicionais apresentam temperaturas de 250 a 350° C, pressões entre 1 a 3 kbar. Contudo, podem alcançar 650° C e 4-5 kbar em alguns depósitos e até baixas temperaturas de 150° C e baixas pressões de 0.5 kbar quando próximas à superfície (Groves *et al.*, 2000).

2.4.2 Migração de fluidos e ambientes de deposição

A teoria de Cox (1999) explica o processo de migração e geração dos fluidos definidos para depósitos auríferos orogênicos em terrenos do tipo *greenstone belt* e consolida os conceitos de *pathway* e de *traps*, posteriormente interpretados por Groves & Santosh (2015), Godfarb *et al.*, (2005), entre outros. Conforme Cox (1999), a migração é dirigida por processos de deformação, pela permeabilidade de rochas e por um de sistema falhas. O fluido é gerado durante a deformação ao longo falhas e zonas de cisalhamento que pertencem a um sistema em larga escala (crustal). Em escala regional, a percolação desse fluido é controlada pela ação de três elementos: *backbone*, que é o eixo central; *dangling*; e por elementos isolados. O *backbone* representa as estruturas que dirigem o fluxo, conectando diretamente todo o sistema. O *dangling* funciona como ramos da estrutura de fluxo principal, alimentando a parte superior do sistema (*upstream*) ou também atua como estrutura de descarga na parte inferior do

sistema (*downstream*). Os elementos isolados estão desconectados dos dois primeiros e são considerados estruturas de baixo fluxo (Figura 2.11).

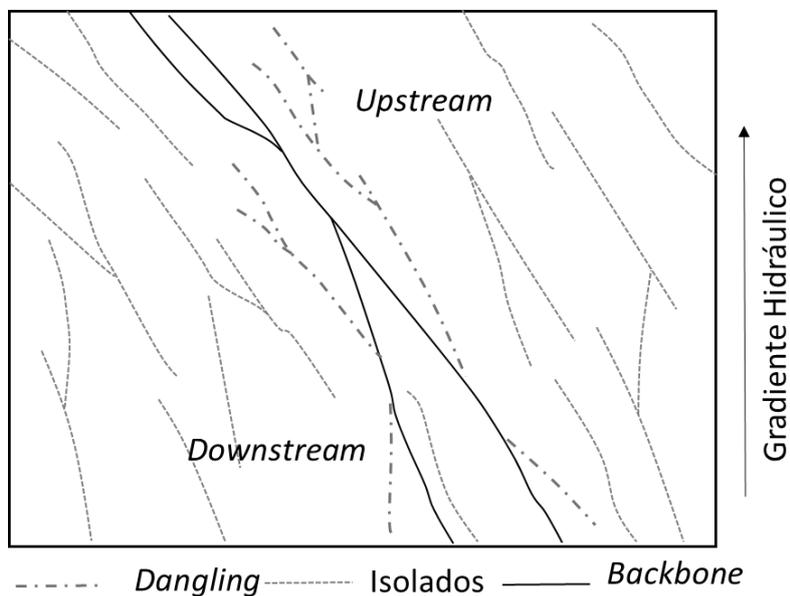


Figura 2.11 Representação dos três elementos que dirigem o fluxo do fluido

No conceito de SM, o *backbone* é interpretado como lineamento de primeira ordem, *dangling* constitui as estruturas de 2ª ordem. A maioria dos grandes depósitos está localizada ao longo de falhas de 1ª ordem, com dimensões acima de 100 m adjacentes às zonas de cisalhamento em escala crustal.

De forma esquemática, a figura 2.12 representa a dinâmica dos fluidos (pequenos círculos) em relação às estruturas. Em uma escala crustal, os lineamentos de 1ª ordem ou *backbone* formam o conduto principal que conecta os resultados dos processos que ocorrem em sistema maior. Em uma escala de distrito ou depósito, a circulação de fluidos imprime estruturas e texturas distintas de acordo com faixas de profundidade e regimes tectônicos. No regime dúctil hipozonal (>12 km), que é caracterizado por altas pressões e temperaturas, a mineralização é formada por veios *stratabound* e foliação plano-paralela aos veios e às texturas de substituição. Em condições mesozonais (12-6 km) de regime rúptil-dúctil, que abrange um maior intervalo de temperaturas e pressões, a mineralização apresenta-se como veios de quartzo-carbonato concordantes e discordantes laminados com padrões *crack-seal*, sigmoides e arranjos de veios. As texturas do tipo *crack-seal* são típicas de faturamento

hidráulico. Depósitos em regime epizonal (<6 km) formam *stockworks*, brechas e *saddle reef*. Em regime rúptil-epizonal, os veios exibem texturas de preenchimento, tais como: *colloforms*, *combs* (pente), entre outras. Todas essas estruturas são exemplos da ação das trapas físicas, chamadas por Cox (1999) de estruturas hospedeiras (*host structures*). Elas são denominadas no sistema mineral de trapas físicas.

Com relação ao tipo de alteração hidrotermal, em geral, ele inclui carbonatação, silicificação e sulfetação. Os halos de alteração que envolvem os veios variam em largura centimétrica à quilométrica. Uma feição comum é a presença de uma vasta zona de carbonatação (Groves *et al.*, 2000; Dubé & Gosselin, 2007), como visto na figura 2.12. Os minerais da zona de carbonatação incluem anquerita, ferro dolomita, siderita e calcita. A sulfetação é vasta nas rochas ricas em Fe, como os *bifs* (Groves *et al.*, 1984).

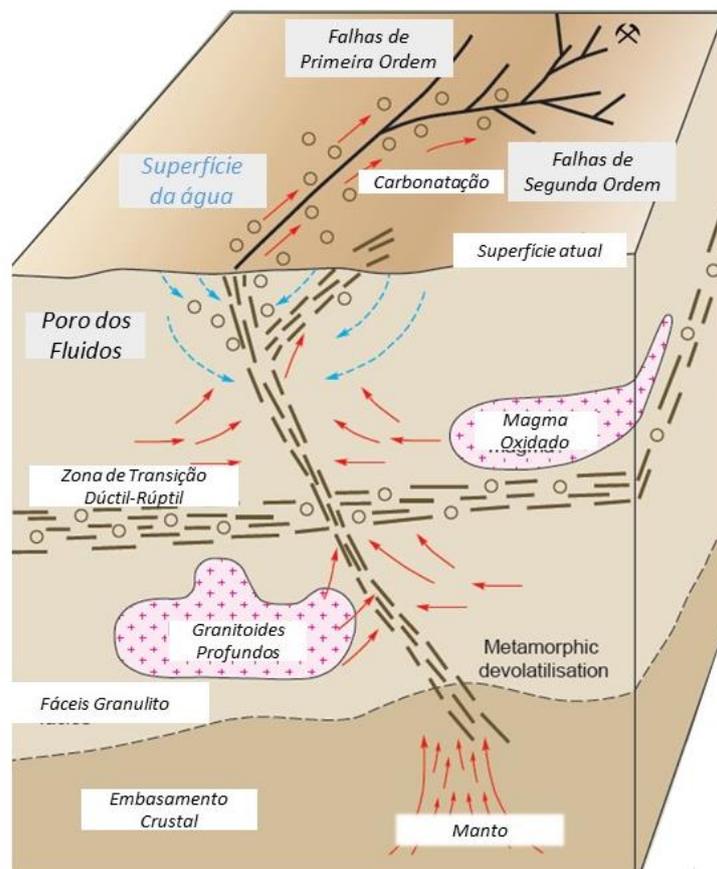


Figura 2.12 Dinâmica da migração dos fluidos em depósitos orogênicos auríferos (Modificado de Goldfarb *et al.*, 2005).

A Avaliação Econômica refere-se à análise sistemática do potencial lucro de alternativas de investimento. No processo de tomada de decisão utilizando-se a análise econômica, o risco e a incerteza são melhor compreendidos. Ressalta-se que não são minimizados, pois sempre estarão presentes em cada cenário. Embora não se possa garantir o sucesso dos projetos escolhidos, a análise de alternativas de investimento pode maximizar o lucro, permitindo a identificação da melhor forma de utilização dos recursos financeiros entre os cenários avaliados (Stermole & Stermole, 1996).

No processo de tomada de decisão, cinco passos são necessários: definição do problema; análise do problema; desenvolvimento de alternativas para solucionar o problema; decisão do melhor cenário; e conversão da decisão em ações efetivas. As fases do processo de decisão estão inseridas no contexto da Avaliação Econômica. A definição do problema é o passo mais importante, pois é necessário estabelecer os pontos-chave, ou seja, as perguntas devem ser as mais precisas de forma que se obtenham as melhores respostas. A análise é o próximo passo, que é o entendimento da complexidade do problema levantado na fase de definição. Essa compreensão resulta na elaboração de cenários ou em alternativas para possíveis soluções do problema. Por fim, decide-se por uma alternativa e, em seguida, ela é testada (Drucker *in* Stermole & Stermole, 1996). O procedimento será aplicado nesta tese, em que se definiram áreas-teste para a aplicação de um método de integração de dados a fim de testar diferentes alternativas de investimento para uma província.

Destaca-se, também, que, na literatura, há uma vasta seleção de métodos de análise de investimento. Eles são utilizados em Economia, Contabilidade, Administração, Engenharia, entre outras áreas. No que se refere à Mineração, é provável que fórmulas e aplicações de conceitos se diferenciem, embora sejam as mesmas técnicas. Para tanto, optou-se por apresentar, em geral, uma revisão baseada em Stermole & Stermole (1994), por ser específica na área de Economia Mineral, os conceitos são os mais aceitos e consolidados.

3.1 Ferramentas tradicionais e/ou determinísticas

Os métodos tradicionais ou determinísticos são ideais para cenários em que não se considera o risco. Essas metodologias englobam o fluxo de caixa descontado ou não

(antes ou depois das taxas e impostos), o valor líquido presente e o retorno de investimento (Stermole & Stermole, 1996).

3.1.1 Fluxo de caixa

As análises econômicas para selecionar projetos procuram valorizar aquele que trará o máximo valor a partir do capital investido. As análises são realizadas, usualmente, segundo esses autores, com base em certa taxa de desconto, um valor presente e um valor futuro. Essas técnicas são baseadas no valor dinheiro no tempo. Assim, são chamadas de técnicas de Análise de Fluxo de Caixa Descontado (Stermole & Stermole, 1996).

O conceito de valor do dinheiro no tempo e o fluxo de caixa (FC) são relacionáveis entre si e são essencialmente usados na Avaliação Econômica. Um fluxo de caixa indica a origem da entrada de todo dinheiro, bem como sua aplicação durante certo período, usualmente igual a um ano e, ainda, o resultado dessas transações. O FC mede o fluxo monetário, o que entra ou sai em um projeto específico. Ele mede, ainda, o excesso por unidade de tempo, de entradas sobre as saídas, provenientes de custos operacionais e de investimentos. O FC pode ser apresentado em forma de diagrama e representa as entradas de saídas (fluxo) de dinheiro no tempo (Figura 3.1).

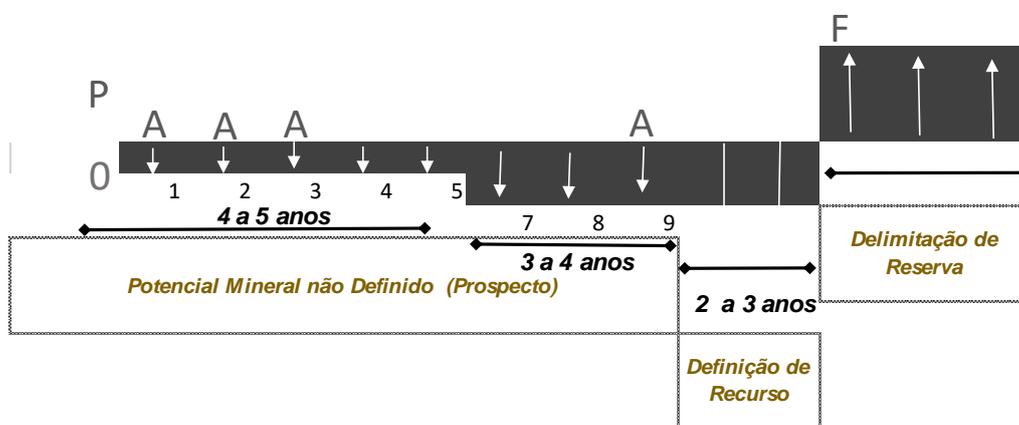


Figura 3.1 – Representação do Fluxo de Caixa de um projeto de ouro desenvolvido desde a fase prospecto até a delimitação da Reserva. O asterisco indica o momento presente. Para um melhor entendimento das fases consultar a Tabela 1.1

De uma maneira geral, os FC podem ser positivos ou negativos. No contexto da exploração mineral, falando-se da etapa final de viabilidade econômica de um projeto, os FC negativos representam uma exigência de investimento e tipificam a pré-produção ou período de exploração/desenvolvimento de um projeto mineral. Para projetos econômicos, a vida útil produtiva da mina é caracterizada por fluxos de caixa positivos

(Doggett & Mackenzie, 2010). Na sequência, os custos de recuperação e de fechamento de mina podem dar origem a um segundo período de fluxos de caixa negativos, os quais não serão abordados neste trabalho. As estimativas de FC devem incluir todos os fatores econômicos associados a uma alternativa. Devem, também, abranger o período total do projeto, começando pelo momento presente e se estendendo até ao futuro incerto ao qual se deslocam.

Nas etapas de exploração mineral, não há receita a ser gerada, contudo um FC será proposto para os prospectos estudados. Ele conterà as despesas relacionadas aos estágios exploratórios apresentados na tabela 3.1. Salienta-se que custos relacionados aos estudos ambientais não serão considerados.

Tabela 3.1. – Estimativas de custo (Despesas do Fluxo de Caixa) para Exploração Mineral

Stages		General Budget (US\$ Million)
Stage 1 <i>(Regional reconnaissance and Surveys)</i>	(2.1) Third Dataset Aquisition (Previous Data) Geological Geochemistry Airborne Geophysics Survey Remote Sensing (Processing and Interpretation)	\$ 0.05
Stage 2 <i>(Regional reconnaissance and Surveys)</i>	Exploration License Aquisition (Emolument payments) (2.2) Regional Geological Check Regional Geochemical Surveys (Surveys soil/stream Sediment) Regional airborne geophysics, ground magnetic and electromagnetic traverses processing. Eventual Rock Sample Analysis	\$ 0.30
Stage 3 <i>(Prospecting and ground surveys of anomalies)</i>	(3) Prospecting Licensing Aquisiting (Fees Payments) First pass follow-up of anomalies/targets by detailed mapping / soil/rock chip sampling and Detailed mapping Rock Ship Sampling Drilling of interesting targets. Ground Geophysics. Drilling of interesting targets. Chemical Analysis	\$ 1.00
Stage 4 until 7	Geometallurgical Tests Budget Engineering Studies Preliminary Feasibility Study	\$ 3.00
Total		\$ 4,350,000

3.1.2 Valor presente e valor presente líquido

A análise de investimento requer que todas as alternativas sejam consideradas em uma mesma base, ou seja, em um mesmo tempo (data ou momento zero). A fórmula contém os seguintes parâmetros (Figura 3.1):

P: uma única soma de pagamento. Normalmente, “P” se refere à soma do dinheiro no momento zero, mas representa a soma do dinheiro em um certo ponto a partir de cada escolha em que se mensura o tempo.

F: um pagamento futuro de uma certa soma de dinheiro em uma data futura.

A: o montante de cada pagamento em séries uniformes de pagamentos iguais que é realizada em cada período. Quando os períodos são dados em anos, “A” refere-se ao pagamento anual ou aos valores anuais.

n: o número de períodos no tempo de avaliação de um projeto.

I: o período da taxa de desconto. Dependendo da situação, “i” pode se referir ao custo do empréstimo do dinheiro, à taxa de retorno de um certo capital, ou ao mínimo da taxa de retorno.

O conceito de dinheiro no tempo, como já discutido no Item 3.11 pode ser calculado de três formas: (1) considerando-se um valor futuro “F”; (2) calculando-se períodos uniformes e iguais “A”; ou (3) calculando-se o Valor Presente (VPL) “P”.

“P” é o valor presente no momento zero de uma certa soma de dinheiro. “A” designa uma série uniforme de pagamentos iguais em períodos compostos “F”.

$$VP = \sum_{t=0}^n = \frac{F}{1/(1+i)^n}$$

3.1.3 Retorno do investimento (Payback)

É o período de tempo necessário antes da recuperação do investimento inicial, ou seja, é o tempo para que o fluxo de caixa readquira o dinheiro investido empregado em um certo projeto (Brealey *et al.*, 2002).

Essa ferramenta é útil na comunicação de uma ideia, uma vantagem do projeto. As decisões de investimento demandam discussões e negociações. Demonstrar em quanto tempo haverá o retorno de um certo capital investido e poder comparar cenários ao gerenciar portfólios são bons argumentos em um processo decisório.

3.2 Métodos probabilísticos

Ao avaliar a possibilidade de sucesso ou fracasso de um projeto, segundo Stermole & Stermole (1994), é necessário incorporar outras ferramentas de análise, tais como: incerteza e risco. Para tanto, serão revisadas algumas dessas ferramentas,

chamadas de probabilísticas. Elas incluem valor esperado, simulação de Monte Carlo e a árvore de decisão.

Valor esperado ou VPL: a diferença principal entre o valor esperado (EV) e o VPL é que o primeiro é uma expectativa do valor ponderada pela probabilidade de ocorrência. De acordo com o Stermole & Stermole (1994), o EV é a diferença entre a expectativa de lucro e a de custo. Aquela refere-se à probabilidade de que o lucro cubra os custos e que estes sejam menores que o lucro obtido.

O valor esperado calcula a recompensa ponderada pela probabilidade de sucesso com as despesas de capital de risco ponderando-se, também, pelo risco de um fracasso. Essa probabilidade é aqui calculada utilizando-se a fórmula proposta por (Mian, 2002), onde:

$$E\{x\} = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i)$$

$E\{x\}$ = é a expectativa do valor, entendido como a expectativa de “VPL”, ou valor líquido presente e,

$P(x_i)$ = implica em $P(X=x_i)$, que é a probabilidade incondicional associada à probabilidade de VPL.

Árvore de Decisão: o modelo de árvore de decisão aplicado à exploração mineral tem seu fundamento, também, na indústria do petróleo. Na figura 3.2, emprega-se a base teórica do modelo de Grayson (1960), com compilações adicionais de Harris (1990). Grayson (1960) apresenta um modelo estatístico da teoria da decisão para um poço em play petrolífero, no qual estipula as seguintes ações: 1) abandonar, 2) sondar; 3) adiar a decisão de perfuração e obter informações adicionais no processo de pesquisa.

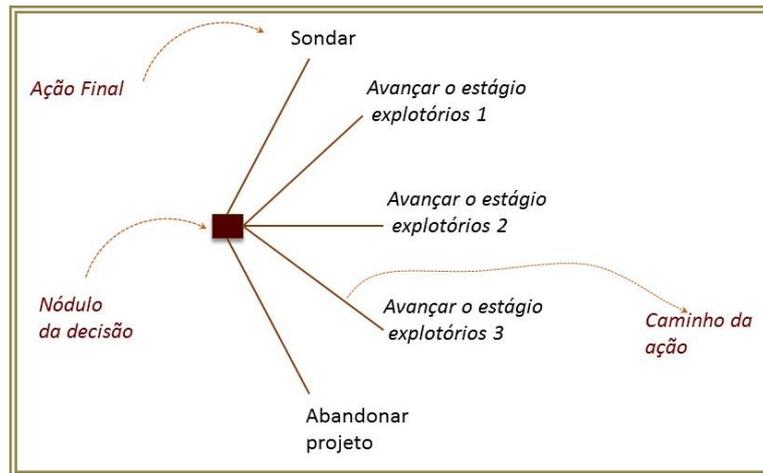


Figura 3.2 - Árvore de decisão para um projeto exploratório estático – Stanlay (1994).

Simulação de Monte Carlo: esse método gera valores aleatórios de atributos incertos, de acordo com as faixas de valores estudadas e as distribuições de probabilidades associadas. É útil em modelos de exploração devido à incerteza quanto à geologia e ao processo de pesquisa. A simulação é uma amostragem aleatória de uma distribuição de probabilidade para o propósito de criar um evento de população representado pela distribuição (Harris, 1990).

3.3 Sistemas minerais e as ferramentas de análise de investimento

O sistema probabilístico de Análise Espacial também deriva da indústria petrolífera, assim como o SM. Segundo Allen & Allen (2005), interpreta-se o Sistema Petrolífero e desenham-se os mapas *Play Fairway*, representados na figura 3.3, Partes II e II. O objetivo é espacializar todos os elementos que compõem o sistema petrolífero (fonte, trapas e selo) e que permitem melhores chances de sucesso na perfuração de poços. Como resultado, tem-se um mapa final de avaliação de risco exploratório, figura 3.4.

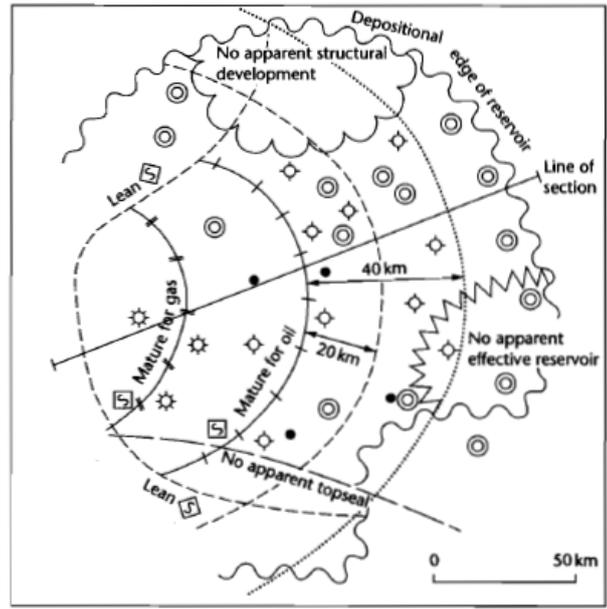


Figura 3.3A – Parte I Exemplo de Mapa de “Play”. Aplicação do Sistema Petrolífero na Exploração de óleo e Gás (Allen & Allen, 2005).

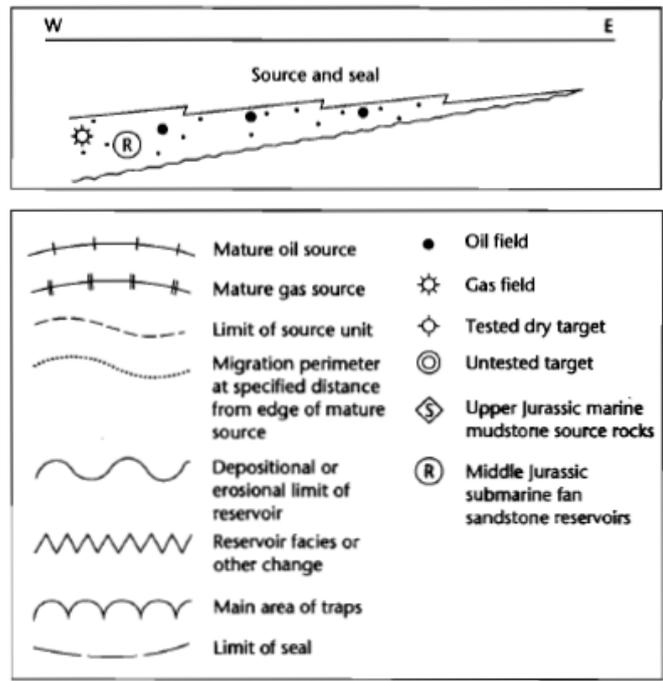


Figura 3.3B– Parte II Exemplo de Mapa de “Play”. Aplicação do Sistema Petrolífero na Exploração de óleo e Gás, Allen & Allen (2005).

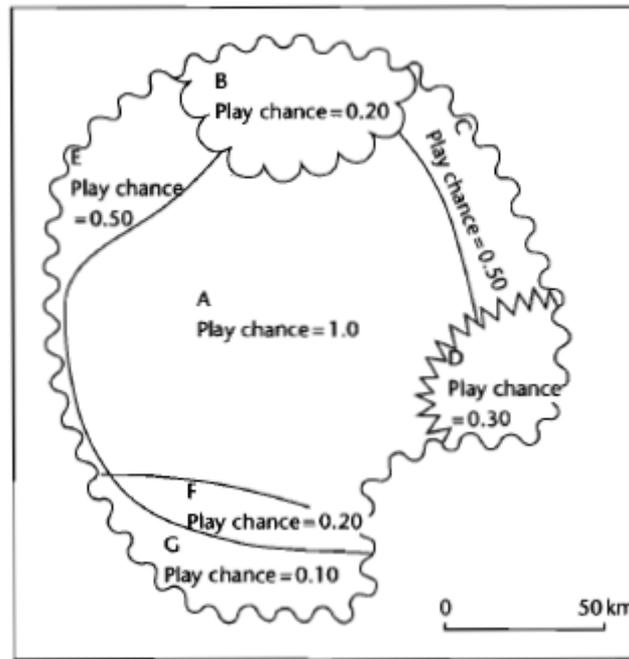
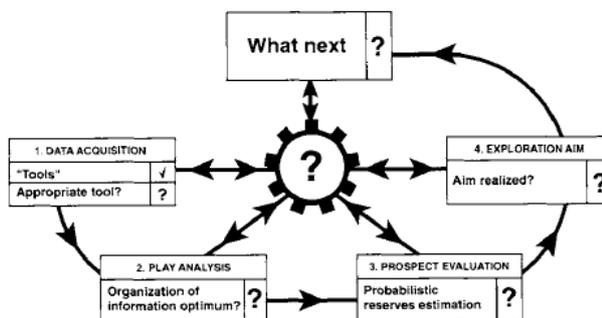


Figura 3.4 – Mapa de avaliação de Risco Exploratório (Allen & Allen, 2005).

Duff & Hall (1996) exemplificam na figura 3.5 um ciclo exploratório utilizando-se a análise do Sistema Petrolífero. Na parte A, é apresentada a exploração sem uma estratégia, sem foco em resultados e aquisição de dados. Nesse caso, a exploração é dispendiosa e ineficiente. No cenário (b), é aplicado o modelo de Sistema Petrolífero, o qual é fundamental em todas as fases de exploração. É eficiente e econômico, guiando as outras etapas e os métodos investigativos. Uma aplicação desse método na mineração é caso apresentado na figura 3.5, em que o SM guia todas as outras etapas subsequentes na exploração aurífera em terrenos do tipo *greenstone belt*.

a)

**Exploration in a Conceptual Vacuum:
Costly, directionless**



b)

**The Exploration Cycle:
Cost-effective, focused exploration**

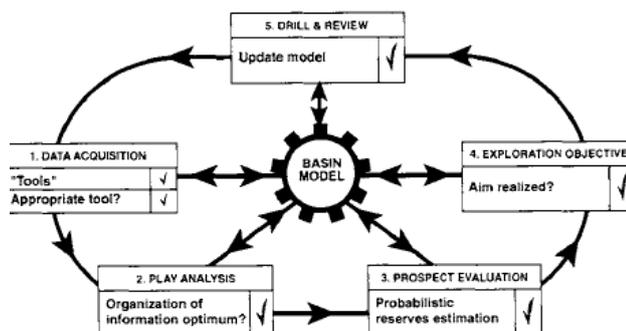


Figura 3.5 – (a) Exploração sem uma estratégia, em (b) utilizando-se o sistema petrolífero, (Duff & Hall, 1996).

Na exploração mineral, essa metodologia foi adaptada primeiramente por Lord *et al.*, (2001) e, posteriormente, por Kreuzer *et al.*, (2008), resumida na figura 3.6. Conforme esses autores, esse método promove uma sistematização da incerteza, convertendo conceitos geológicos em modelos de negócio.

No modelo proposto por Kreuzer *et al.*, (2008) são indicados quatro passos. O resultado final é a seleção de projetos e a facilitação do processo de tomada de decisão. A primeira etapa é a elaboração ou interpretação do SM. Isso inclui: a) formulação dos processos do modelo geológico; b) identificação desses processos e seus fatores críticos. Na sequência, são calculadas as assinaturas da probabilidade de cada fator por meio da seguinte fórmula:

$$P = P1 \times P2 \times P3 \times P4 \dots \times x$$

Em que:

P: é a probabilidade.

P1: representa a probabilidade de ocorrência da fonte do fluido mineralizante.

P2: é a presença de estrutura relevante ao transporte de fluido e a deposição do minério.

P3: refere-se às estruturas ou aos outros componentes físicos.

P4: corresponde aos componentes químicos do processo que reforçam a precipitação do minério.

Após o cálculo da probabilidade de cada fator, são mensurados, para cada bloco, o valor de VPL. Esse valor será o EV. Contudo, em vez do cálculo de um valor apenas, teremos um intervalo de valores (mínimos e máximos), tal como demonstrado na figura 3.6, em estimativa de VPL do Projeto.

Os passos finais do processo de avaliação são a realização da análise da árvore de decisão e Simulação de Monte Carlo.

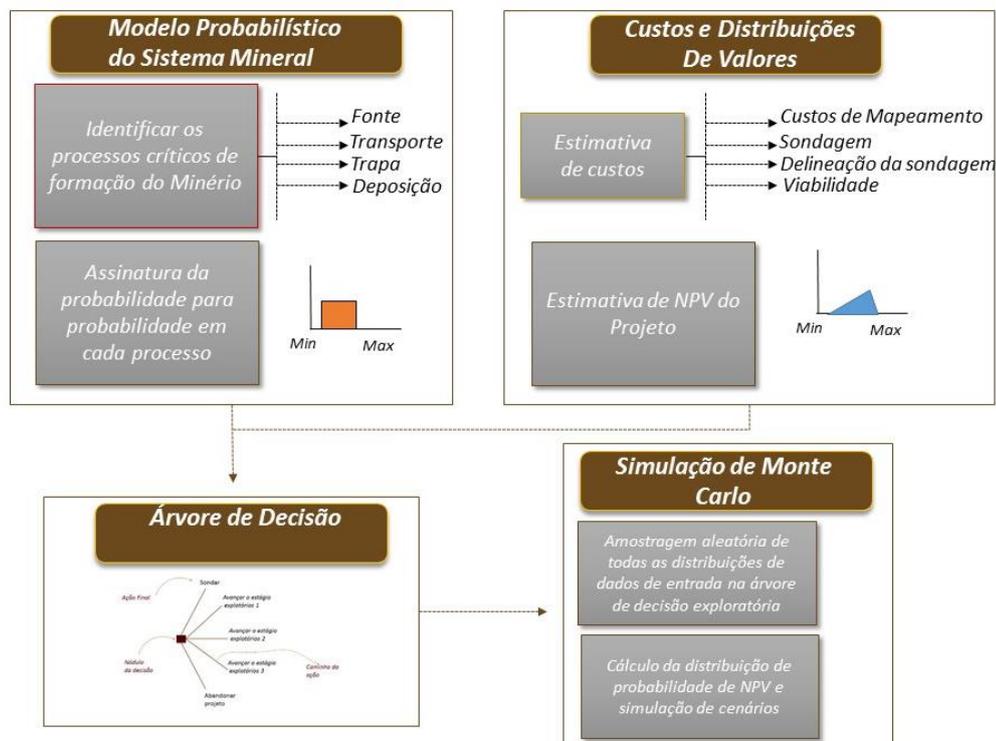


Figura 3.6 – Modelo de decisão integrado, conjugando a abordagem dos métodos quantitativos e as ferramentas de análise de investimento, modificado de Kreuzer et al., (2008). O modelo probabilístico do sistema mineral foi elaborado por Lord et al., 2001).

Os resultados deste trabalho foram compilados em formatos de artigos. O primeiro é intitulado *Multi-process and multi-scale spatial predictive analysis of an orogenic gold system, Rio das Velhas Greenstone Belt, Brazil*. Ele apresenta os resultados da adaptação da abordagem de Sistemas Mineraiis à Província do Quadrilátero Ferrífero – MG, a partir da elaboração de um modelo conceitual. O foco principal foi dado aos depósitos auríferos orogênicos hospedados em BIF's, máficas e ultramáficas. As características da mineralização e seus controles foram categorizados nos elementos que constituem um sistema mineralizante aurífero, como: fonte, trapas (físicas e químicas) e sites de deposição. Esses elementos foram representados espacialmente por meio da integração de dados multifontes, cuja a expressão do mineral *endowment* e dos processos geológicos fossem mapeados em três escalas diferentes.

O segundo artigo, denominado de “*Decision Analysis for Early Stages of Mineral Exploration – A Resource Assessment in Rio das Velhas Greenstone Belt*”, discuti em um primeiro momento, a estimativa dos valores de teor e tonelagem por meio da análise de Monte Carlo (Probabilidade), baseando-se em depósitos já conhecidos em cada distrito aurífero, a saber: Nova Lima, Cuiabá-Lamego e Córrego do Sítio. O artigo foca apenas no cenário dos depósitos hospedados em formações ferríferas bandadas em função da indisponibilidade de informações econômicas para outros tipos de depósitos. A importância desta etapa no desenvolvimento na tese é ter insumos (dados) da média de teor e tonelagem para o cálculo financeiro que será realizado na última etapa. A organização preliminar do artigo é apresentada no tópico 4.2. Consta também, o ranqueamento econômico, tanto dos aspectos geológicos, geoquímicos e geofísicos integrados no artigo 01, como também, da análise financeira. Para cada conjunto de prospectos com mesmas características (áreas potenciais – artigo 01), classificados como 3A, 3B e 3C será simulado um fluxo de caixa, como também será calculado seu valor esperado (*Expected Value*). O resultado foi integrado em uma árvore de decisão e depois analisado qual melhor cenário a ser optado.

4.1 Modelo Conceitual – Sistema Mineral Rio das Velhas (SMRV) e Modelagem Espacial

O conceito de sistema mineral, como já apresentado, pode ser descrito pela combinação dos processos geológicos envolvidos desde a formação de um depósito até sua preservação. Esses processos segundo Wyborn *et al.*, (1994), podem ser investigados em várias escalas. Na modelagem, elas desempenham um papel significativo, pois marca o mapeamento de processos que se acentuam à medida em que se aumenta a escala de observação de um depósito (Hronsky & Groves, 2008).

Nesta pesquisa, simulou-se modelos de favorabilidade mineral para a porção central do Quadrilátero Ferrífero (QF), onde o foco dessa análise foram os depósitos hospedados nas sequências vulcano-sedimentares do *Greenstone Belt* Rio das Velhas (GBRV). Essa região apresenta elementos característicos para formação de depósitos *world class* do tipo orogênico, caracterizando-se *endowment* aurífero. Dentre esses elementos, destacam-se a transição geodinâmica favorável e a heterogeneidade deformacional (Groves *et al.*, 2015). O primeiro elemento corresponde a idade do GBRV, que é marcada por um período de espessamento crustal em torno de 2.7 Ga, resultante de processos tectônicos colisionais e, portanto, cenário para geração de fluidos mineralizantes metamórficos. Esse fato fundamenta-se nos dados estatísticos que indicam a associação de diversos depósitos classificados como orogenéticos arqueanos correlacionados às etapas finais de eventos compressivos (Groves *et al.*, 2003). O segundo elemento, apresenta uma correlação espacial entre os principais depósitos de ouro e as estruturas regionais de 1ª ordem, além das sucessivas reativações dessas estruturas regionais em eventos tectônicos subsequentes.

Um modelo descritivo foi proposto para SMRV baseado na revisão dos processos geológicos que podem estar relacionados à formação dos depósitos auríferos hospedados no *GBRV*, e estão sumarizados na figura 4.2. Uma discussão mais detalhada dos componentes do Sistema Mineral Rio das Velhas é apresentada no artigo 01 no tópico de Geologia regional, geodinâmica e mineralizações associadas (*Regional Geological Context, Geodynamic and Associated Mineralization in the Rio das Velhas Greenstone Belt*).

Em resumo, os processos de magmatismo e deformação definem uma janela temporal em cerca de 2.7 a 2.6 Ga, que forneceu a energia necessária para geração de fluidos mineralizantes atuando na fertilidade da porção central do Quadrilátero Ferrífero

(Fonte). Esses fluidos foram transportados por meio de estruturas profundas geradas nos eventos D1, D2 e reativadas no evento D4 (*Pathway*), hospedando-se e preservando-se em várias litologias da estratigrafia do GBRV e preservadas pela ação de **trapas químicas e físicas**. A interação entre fluído e rocha hospedeira também deixa rastros, constituindo os processos de alteração hidrotermal, denominados no sistema mineral de “*deposition outflow*”.

Os modelos foram elaborados a partir da aplicação de uma técnica de análise espacial, denominada de lógica *fuzzy*, previamente discutida no capítulo 2. Levando-se em consideração o conceito de sistema mineral, essa técnica foi escolhida em função de sua propriedade essencial que é modelar a existência de processos no qual um evento ocorre. Assim, integrando-se os mapas evidenciais de acordo com sua respectiva resolução e escala, buscou-se mapear os processos geológicos que representassem os componentes do Sistema Mineral Rio das Velhas.

A lógica *fuzzy* é fundamentada na teoria dos conjuntos *fuzzy* desenvolvida por Zadeh (1965) que permite a modelagem em zonas de imprecisões e incertezas. Foi adaptada à integração de dados na geologia por Bonham-Carter (1994). A principal característica da teoria dos conjuntos *fuzzy* é a atribuição de uma função de pertinência a um conjunto de dados. Dessa forma, viabiliza-se a análise com grau de pertinência entre zero e um, um elemento pertence aos conjuntos A e B, em vez de usar o raciocínio clássico sim (1) ou não (0) da teoria dos conjuntos. Cada camada de informação (*layer* ou dado) pode ser combinado e por consequência denominado na modelagem de “mapa evidencial”. Esses mapas receberam valores de *fuzzy membership* ou seja, fuzzificados de 0-1 ou valores *crisp* de 1-10, por meio das funções *large*, *near* e *small* (Bonham Carter, 1994; Carranza, 2009; Nykanen *et al.*, 2008; Tsoukalas & Uhrig, 1997).

Com base nessa técnica, três modelos de favorabilidade (escala de província, distrito e bloco) foram propostos. Para os modelos de escala regional e intermediária utilizou-se dados de baixa resolução de amostragem, pois o foco foi a delimitação do endowment aurífero. O modelo em escala de bloco, incluiu dados aerogeofísicos de alta densidade de amostragem e apresenta um detalhamento da assinatura do conjunto dos depósitos.

O modelo em escala de província, nomeado de M1, compreende todo o QF. Esse modelo foi integrado na escala 1:500.000 e delimitou o endowment aurífero arqueano,

que contextualiza o potencial metalogenético para depósitos orogênicos, selecionando-se o ambiente tectônico do GBRV. O modelo seguinte M2, em escala intermediária (1:100.000), caracteriza os diferentes distritos auríferos arqueanos que ocorrem no greenstone e por último, o modelo em escala de semi-detalle, M3 (1:50.000), seleciona os possíveis alvos exploratórios em cada distrito. O resultado final é a progressiva seleção de áreas simulando-se um programa exploratório regional.

Os componentes do SMRV, como fonte, *pathway*, trapas (físicas e químicas) e dispersão geoquímica (*deposition outflow*) foram representados na tabela 4.1. Para apresenta um sumário dos processos geológicos, os parâmetros a serem modelados e os dados utilizados nas três escalas de modelagem.

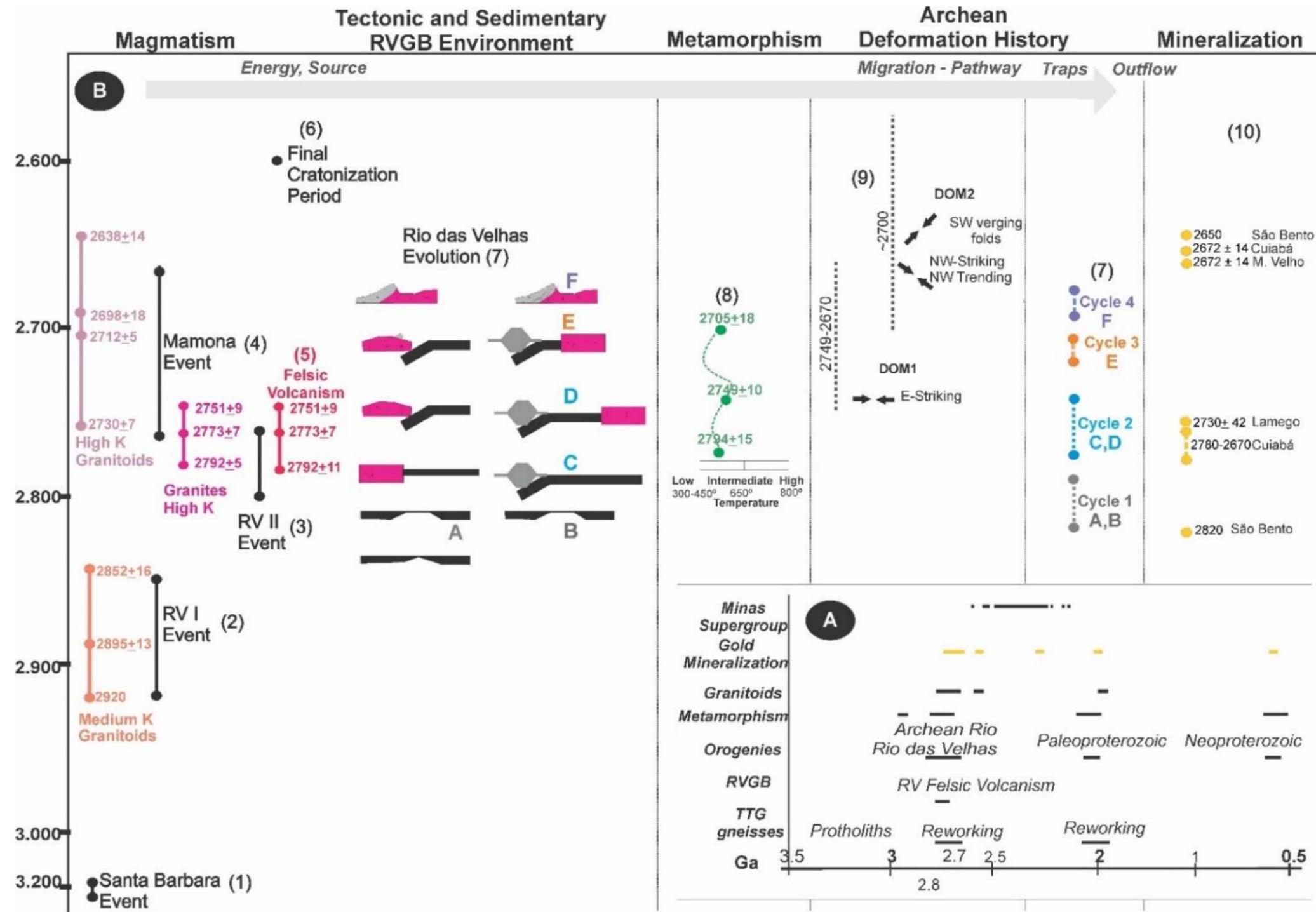


Figura 4.2 - Quadro de eventos geológicos do GBRV (A) Detalhamento dos eventos geológicos que ocorreram no Arqueano. (B) Sumário dos eventos geológicos do Arqueano ao Neoproterozóico.: Eventos Magmáticos (1 Lana *et al.*, 2013; 2 Lana *et al.*, 2013, Farina *et al.*, 2015, 3 Farina *et al.*, 2015, 4 Romano *et al.*, 2013, Farina *et al.*, 2015; 5 Machado *et al.*, 1992, 1996; Noce *et al.*, 2005; 6 Período de Cratonização (Romano *et al.*, 2013); 7 Evolução do Rio das Velhas (Baltazar & Zucchetti 2007); 8 Metamorfismo (Farina *et al.*, 2015 Farina *et al.*, 2015); 9 Deformação (Baltazar e Zucchetti, 2007; Alkmim, 2004; Marshak *et al.*, 1997); 7 Tectônica e Sedimentação no GBRV (Baltazar e Zucchetti 2007) e 10 Mineralização Aurífera (Noce *et al.*, 2005, Lobato *et al.*, 2007, Martins *et al.*, 2017).

Tabela 4.1 – Parâmetros-chave utilizados no processo de Modelagem espacial do Sistema Mineral Rio das Velhas

Source - História termal e origem de fluidos mineralizantes

Key-Parameters	Parameters Descriptions	Relação Espacial (Spatial Proxy)	Dados (Primary Data)	Escalas	Data Processing	Operador Fuzzy (Fuzzy Operator)	Modelagem Espacial Sistema Mineral RV
Energia	Historia colisional	Proximidade de Estruturas de 1a ordem	Falhas	1:1000.000	Buffer de 500 a 200m	Fuzzy Near	M1
Fluidos	Eventos de escala Regional de formação de Crosta. Período de cratonização. Magmatismo. Metamorfismo.	Dados Geocronológicos	Dados da Literatura		-	-	
Ligantes, Metais	Fontes Crustais	Contato das rochas do GBRV com Granitóides do Embasamento (Idade?)	Gravimetria Satelital	1:1000.000	Anomalia Bouguer: Classificação Supervisionada separar fontes do embasamento	Fuzzy Categorical	M2 M3
					Anomalia Bouguer: Classificação Supervisionada separar fontes: das supracrustais ricas em Fe.	Fuzzy Categorical	
	O ouro está associado com rochas ricas em Fe da sequência GBRV		Unidades Litológicas	1.1000.000 1:100.000 1:50.000	Reclassificação das unidades ricas em Fe da Sequência do GBRV	Fuzzy Categorical	M2 M3
				1:100.000 1:50.000	Amplitude do Sinal Analítico - Asa. Classificação Não supervisionada	Fuzzy Large	M2 M3
				1:50.000	Índice Máfico. Classificação Não supervisionada de domínios de alta amplitude do Sinal analítico e baixos valores de K, eTh, eU.		M3

Pathway- Sistemas de percolação de fluidos mineralizantes

Key-Parameters	Descrição dos Parâmetros	Relação Espacial (Spatial Proxy)	Dados (Primary Data)	Escalas	Data Processing	Operador Fuzzy (Fuzzy Operator)	Modelagem Espacial Sistema Mineral Rio das Velhas
Conduitos de fluidos	As mineralizações do GRV estão relacionadas a lineamentos e estruturas de escala relacional.	Proximidade de Falhas de 1a Ordem (Transcrustais) e possível atuação do fluido. Rampas oblíquas e falhas de empurrão direção NW/NE e NE/SE e falhas transcorrentes E-W.	Mapas Geológicos - Falhas	1.1000.000	Zona de influência de 500 a 2000 m (Buffer)	Fuzzy Near	M1
				1:100.000	Zona de influência de 500m (Buffer)		M2
				1:50.000	Zona de influência de 100m (Buffer)		M3

Cont. Tabela 4.1

Traps Chemical and Physical

<i>Key-Parameters</i>	<i>Descrição dos Parâmetros</i>	<i>Relação Espacial (Spatial Proxy)</i>	<i>Dados (Primary Data)</i>	<i>Escalas</i>	<i>Data Processing</i>	<i>Operador Fuzzy (Fuzzy Operator)</i>	<i>Modelagem Espacial Sistema Mineral RV</i>
Trapa Estrutural	A mineralização está controlada pela intersecção de estruturas secundárias relacionadas aos lineamentos ou estruturas de 1a ordem.	Eixo de Dobras	Não Mapeado nas escalas de estudo			-	-
		Direção de Veios de Quartzo	Mapa de densidade de veios de quartzo		Mapa Kernel a partir dos pontos com as direções de veio de quartzo. Estima a densidade Kernel, onde desenha uma vizinhança circular no entorno de cada ponto e corresponde a sua área de influência.	Fuzzy Near	
Trapa Química/Dispersion Outflow	Processo de sulfetação induziu a instabilidade de complexos de ouro. Assim como a redução do fluido pela interação da matéria carbonosa, influenciou o equilíbrio de oxi-redução, aumentando a precipitação do ouro em ambos casos.	Rochas reativas ricas em Fe e C	Geoquímica Regional	1.100.000 1:50.000	Combinação de Mapas Geoquímicos	Fuzzy Large	M2/M3

Dispersão de Fluidos- Outflow Zone (Deposição)

<i>Key-Parameters</i>	<i>Descrição dos Parâmetros</i>	<i>Relação Espacial (Spatial Proxy)</i>	<i>Dados (Primary Data)</i>	<i>Escalas</i>	<i>Data Processing</i>	<i>Operador Fuzzy (Fuzzy Operator)</i>	<i>Modelagem Espacial Sistema Mineral RV</i>
Trapa Química/Dispersão de fluidos	Processo de sulfetação induziu a instabilidade de complexos de ouro. Assim como a redução do fluido pela interação da matéria carbonosa, influenciou o equilíbrio de oxi-redução, aumentando a precipitação do ouro em ambos casos.	Halos de dispersão geoquímica (alteração hidrotermal)	Geoquímica Regional	1.100.000 1:50.000	Combinação de Mapas Geoquímicos	Fuzzy Large	M2/M3
			Geofísica		Combinação de Mapas Geofísicos		

4.2 Paper 01 - Multi-process and multi-scale spatial predictive analysis of an orogenic gold system, Rio das Velhas Greenstone Belt, Brazil

Objetivo: O artigo apresenta os resultados da adaptação da abordagem de Sistemas Mineraiis à Província do Quadrilátero Ferrífero – MG, focando-se nos depósitos auríferos orogênicos hospedados em BIF's, máficas e ultramáficas. As características da mineralização e seus controles foram categorizados nos elementos que constituem um sistema mineralizante aurífero, como: fonte, trapas (físicas e químicas) e sites de deposição. Esses elementos foram representados espacialmente por meio da integração de dados multifontes, cuja a expressão do mineral endowment e dos processos formados dos depósitos fossem mapeados em três escalas diferentes.

Summary

Abstract	66
Introduction	68
Geodynamics	70
Gold Mineralization	72
Province-Camp-Scale Predictive Targeting Methodology	73
Data	73
Geological Data	73
Satellite Gravimetric Data	73
Airborne Geophysical Surveys	73
Deposits Database	74
Geochemical Data	74
Methods	74
Geophysics:	74
Geochemistry:	75
Geology:	76
Modelling	76
Rios das Velhas Mineral System	76
Gold Source and Fertility	77
Percolation of Fluids (Pathway) and Favorable Architecture	78
Traps and Gold Deposition	79
Rio Das Velhas Endowment Model (M1)	80
District-Scale Model (M2)	81
Camp-Scale Model (M3)	82
Conclusions	83
Acknowledgments	84
REFERENCES	85

Multi-process and multi-scale spatial predictive analysis of an orogenic gold system, Rio das Velhas Greenstone Belt, Brazil

Juliane Cristina Ferreira Uchôa¹, Catarina Labouré Bemfica Toledo¹, Adalene Moreira Silva¹, Augusto Ferreira Mendonça², Steffen Hagemann³, Adriana Chatack¹, Oliver Kreuzer^{4,5}

¹ Institute of Geosciences/University of Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro S/n, Asa Norte, 70910-900 Brasília – DF, Brazil

²Independent Consultant, Brasília,

³Center for Exploration Targeting (CET) – UWA

⁴Economic Geology Research Centre (EGRU), School of Earth & Environmental Science, James Cook University, Townsville, QLD 4811, Australia

⁵Concept to Discovery, PO Box 5128

Corresponding author: e-mail address, ju.ferreira.uchoa@gmail.com.br

Abstract

Orogenic gold deposits are distributed in certain periods of time, relating to collisional orogens, aligned to major faults, brittle-ductile structures, hosted in a variety of lithologies metamorphosed to lower-upper greenschist facies. Their genetic components can be examined in a system context. This system represents geological processes whose expressions differ according to the scale of observation. Thus, this present work involves a multi-process and multi-scale spatial modelling method based on fuzzy logic. Using this approach, it is possible to map the mineral favorability of the gold-depositional processes at various scales. This method was applied to the Iron Quadrangle (IQ), Brazil, at three scales – Province- (1:500,000), District- (1:100,000), and Camp-scale (1:50,000) — focusing on the description of the Rio das Velhas Mineral System (RVMS). The modelling was undertaken in the framework of the mineral systems approach, using the knowledge driven (conceptual) fuzzy logic technique of spatial modelling. At each scale, multiple geological, geophysical, and geochemical datasets were used that represent the underlying geological processes involved in the genesis of orogenic gold systems. The result indicated potential areas in mafic and ultramafic rocks and banded iron formations that are the hosts with the highest occurrence of the highest grade and tonnage deposits.

The fertility of the RVMS is attributed to a tectonothermal event that occurred during the final phases of the Archean of the Rio das Velhas Greenstone Belt (~2.77 Ga), and was reactivated during subsequent events in the Paleoproterozoic (~2.0) and Neoproterozoic (Brasiliano) (0.6 Ga), which generated metamorphic fluids and concentrated the gold into different sequences of the

RVGB. The favorable architecture refers to the first-order lineaments that allowed percolation of the mineralizing fluid. The gold source or source region is interpreted to be the sequences of the Rio das Velhas Greenstone Belt which during regional metamorphism devolatilized thereby liberating metals in the metamorphic hydrothermal fluids. The pathways (i.e., active, highly effective conduits facilitating the migration of gold-bearing fluids) are interpreted as being first-order structures, such as regional thrust faults and large folds that originated in the Archean and were reactivated during the Proterozoic. The physical traps (i.e., localized zones of extreme crustal permeability and intense fracturing) are represented by second-order structures such as fold hinges and shear zones which can contain concordant or discordant veins. Some lithological traps (i.e., rheological contrast between rock units) can also operate as chemical traps. Finally, the geochemical dispersion operates during syn- and post-ore deposition. Based on the understanding and description of the elements and components of the RVMS, three modelling scenarios were formulated and tested using the fuzzy logic technique. The first model defines the gold endowment, indicating areas with high relevance for exploration in the Rio das Velhas greenstone belt, whereas the second model (i.e., intermediate-scale) highlights the different gold districts. The third model (i.e., camp scale) identified the most favorable areas during early exploration stages. The results obtained from these models are validated because they successfully predicted known mines, occurrences and prospects for all of the scenarios.

Keyword: Multi-scale, orogenic gold, predictive analysis, Rio das Velhas Greenstone Belt, mineral systems approach.

Introduction

Orogenic gold deposits hosted in metamorphic greenstone belts results from the combination of many geological processes that can be described as an orogenic gold system (Hagemann and Cassidy, 2000; Goldfarb et al., 2001; Pirajno, 2009; Wyman et al., 2016). These mineralizations are associated with craton margins marked by suture zones and translithospheric boundaries. At the continental scale, orogenic gold deposits occur in collisional environments and are positioned in geological periods from the Late Archean (3.2–2.7 Ga) and Paleoproterozoic (2.1–1.8 Ga) to the Phanerozoic (0.5 Ga), coinciding with large global tectonic cycles of crustal creation and thickening (Groves et al., 2005). Such events generate energy and mineralizing fluids required in the formation of orogenic gold deposits (Hronsky et al., 2012; Witt et al., 2013 and Groves Santosh, 2015). From this scale in the province, geological process can also produce structural architecture, including zones of heterogeneity - pathways (Hagemann et al., 2016). At the district scale level, these fluids pass in a variety of rocks from the stratigraphy of the greenstone basin itself, and they are preserved under the action of physical and chemical traps (Wyborn et al., 1994; Groves et al., 2005; Hronsky et al., 2008).

These processes can be diagrammed and represented by favorability maps using the mineral system approach. The concept of mineral favorability refers to the chance or likelihood that mineral deposits of the type sought can be found in a piece of land (Carranza, 2009). Applying the spatial modelling and the mineral system approach in targeting generation, instead of mineral deposits, the final maps will be representing process in each scale.

The mineral system approach is based on the premise that mineral deposits are the focal points of much larger earth process systems that operate on a variety of scales to focus mass and energy transfer. In this context, a mineral deposit represents a combination of the processes, starting with the mobilization of mineralizing fluids from the source, and their transport, accumulation, and preservation during the subsequent geological history (Wyborn et al., 1994).

In this context, the present article discusses a spatial analysis approach for recognizing the geological processes that are thought to have formed orogenic gold deposits in the central portion of the Iron Quadrangle of Brazil (IQ). The gold deposits in the IQ are of Archean age (~ 2.7 Ga), with subsequent gold remobilization or new introduction in the Paleoproterozoic (2.0 Ga) and Neoproterozoic (0.6 Ga); these periods coincide with important orogenies that occurred in Rio das Velhas (Neoarchean), the Paleoproterozoic, and the Neoproterozoic (Brasiliano), respectively. Gold mineralization within the Rio das Velhas Greenstone Belt is spatially associated with thrust faults and shear zones and hosted by various lithologies, although the deposits with the higher Au grades and greater tonnages are associated with iron-rich sequences, such as mafic and ultramafic igneous rocks and banded iron formations (BIFs).

The proposed analysis method uses the knowledge-driven fuzzy logic technique, which involves modelling the components of the Rio das Velhas Mineral System at three scales (fig. 1B):

- Model M1, denominated mineral endowment (1:500,000 scale), which describes the processes of geological fertility, favorable architecture, and geodynamic period;
- Model M2, the district-scale model (1:100,000 scale); which describes the process that occur as “zones metallization” or cluster of goldfields defined by Harris (1984).
- Model M3 (1:50,000 scale), which shows migration, and geochemical dispersion.

The benefit of this analysis and its application in an exploratory program is that it can be addressed at each scale, and that it results in a better understanding of geologic processes and factors that may be related to the formation of ore deposits. Also, it could improve quality control of digital data, understanding of critical geological factors to be used in follow-up exploration, ranking of prospects and prioritizing exploration.

Regional Geological Context, Geodynamics and Associated Mineralization in the Rio das Velhas Greestone Belt

The Rio das Velhas Greenstone Belt is part of the São Francisco Craton, which comprises three main domains: Archaean granite-gneiss complexes and volcano-sedimentary supracrustal sequences of greenstone belt type, as well as Paleoproterozoic sedimentary sequences (Fig. 1D).

The basement is represented by gneisses and granites of trondhjemitic-tonalitic-granodioritic (TTG) composition, distributed in metamorphic complexes named Bonfim, Caeté, Belo Horizonte, Bação and Santa Bárbara (Herz, 1970 in Noce, 2000) with protolith ages ranging from 3.38 to 2.90 Ga (Teixeira et al., 1996). For the basement, it is also included two generations of Archaean plutons: a calcium-alkaline suite ranging in age from 2.78 to 2.77 Ga, and anorogenic granites ranging in age from 2.73 to 2.61 Ga (Machado et al., 1992; Romano, 1989 in Baltazar and Zucchetti, 2007). An interval within 2.9 Ga and 2.7 Ga was investigated by Machado et al., (1992) and Noce et al., (1998) using U-Pb geochronological method. The results, suggesting a period of partial melting around the crust in 2.9 Ga.

Dorr et al., (1957) originally described the Rio das Velhas Greenstone Belt as the Rio das Velhas Series and later Almeida (1976) and Schorscher (1976, 1978) interpreted it as a typical greenstone belt type rock sequence. The group of rocks that make up the RVGB was initially subdivided into two groups (Dorr et al., 1957): the Nova Lima Group, at the base, consisting of metavolcanic (ultramafic, mafic and felsic) and metasedimentary rocks; and the Maquiné Group, on the top, made up of conglomerates, quartzites and phyllites. Age dating by the U-Pb method of zircons extracted from Nova Lima Group felsic volcanic rocks indicate a depositional age of 2.7 Ga (Machado et al., 1992).

Baltazar and Zucchetti (2007) applied the lithofacies associations of Lowe (1994) and defined four sedimentary cycles for the RVGB (Fig. 1) presenting the most recent revision of its tectonic-stratigraphic subdivision. According to the authors, the spatial distribution of the cycles is marked by shear zones that juxtaposed tectonic blocks with distinct lithostructural characteristics. Cycle 1 is represented by mafic to ultramafic volcanic rocks with intercalations of chemical sedimentary rocks. Cycle 2 is composed of associations of clastic and chemical sedimentary rocks. Cycle 3 comprises sedimentary rocks, belonging to the volcanoclastic and resedimentation lithofacies and, finally, Cycle 4 is represented by clastic sedimentary rocks belonging to the association of non-marine lithofacies.

Geodynamics

Based on previous studies, a geodynamic framework of the RVGB is arranged according to magmatism and metamorphic events, deformation history, and tectonic-sedimentary environment (Fig. 2). In general, these events are temporally and spatially related, but they are individually described to associate the geological processes and the components of the Rio das Velhas Mineral System. In order to facilitate the identification each event has been listed and enumerated. The greatest emphasis is placed on the Archean, as the gold deposits found in the RVGB are interpreted as Archean in age, with additional mineralizing pulses in the Paleo- and Neoproterozoic (Lobato et al., 2001).

Lana et al., (2013) and Farina et al., (2015) recently reviewed the magmatic events in the area, identifying three periods associated with tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) generation: (1) the Santa Bárbara; (2) the Rio das Velhas I - RVI, (3) the Rio das Velhas II - RVII and (4) Mamona event. The initial stage of magmatism — recorded between 3212 and 3210 Ma — led to the formation of the well-represented Paleoarchean nucleus in the Santa Bárbara complex (Santa Bárbara event). The second event, Rio das Velhas I produced most of the TTG magmatism called “Medium K Granitoids”, which occurred in two stages between 2.93-2.85 Ga and 2.80 -2.76 Ga. That represents two earlier periods of magmatism associated with greenstone belt deposition (Lana et al., 2013). The Rio das Velhas II event took place between 2.80 Ga and 2.76 Ga, suggested that the entire crust around the Iron Quadrangle was affected by magmatism and amphibolite-facies metamorphism, interpreted as a recycling event of older orthogenesis and by partial melting of the mafic oceanic crust (Farina et al., 2015a). The RVII also overlapped in age with the extrusion of felsic volcanic (5) units and fluvial/turbiditic sedimentation on top of mafic–ultramafic lavas of the Rio das Velhas Greenstone Belt (Lana et al., 2013). The High K Granitoids, also known as the Mamona event, occurred during 2.76–2.68 Ga, just after Rio das Velhas II and represents about the 30% of the Archean basement exposed in the Iron Quadrangle according to Romano et al., (2013).

The tectonic-sedimentary environment of the RVGB was presented by Baltazar and Zucchetti (2007); the authors correlated the sedimentary facies with the evolutionary stages of the greenstone basin. Cycle 1 arose in an extensional tectonic regime of submarine plateaus. Cycle 2 was associated with the initial stages of felsic volcanism (2792 ± 11 Ma, 2773 ± 7 Ma, 2751 ± 9 Ma; Machado et al., 1992, 1996; Noce et al., 2005), interpreted as the final stages of the oceanic extensional basin and the aggregation of the subduction phase. Cycle 3 occurred in a transitional environment between submerged fans and non-marine successions related to the felsic volcanic structures generated in island arc environments. Cycle 4 is interpreted as alluvial fan deposits formed in retroarc foreland-basin with a supply of material from the previous cycles.

The metamorphism is related to at least three events, which yielding dates that correspond to the same periods as the magmatism, as well as the orogenic events. The first one acted on the rocks of the TTG substratum, generating migmatization and metamorphism to upper amphibolite facies grade, which is related to the beginning of the Rio das Velhas II event (Lana et al., 2013). The second Archean metamorphic event was of low metamorphic grade (greenschist to lower amphibolite facies) and affected the RVGB units, and it is related to the Rio das Velhas orogeny that occurred between 2.8 and 2.7 Ga (Machado et al., 1996) as well as to the emplacement of late-post-collisional granitoids (2.71 Ga) included in the Mamoma event (Farina et al., 2015). The third event is related to the Transamazonian orogeny, which occurred at the end of the Paleoproterozoic and generated tonalites and trondhjemites between 2.16 and 2.12 Ga (Noce, 1995; Noce et al., 1998). The last metamorphic event occurred in the Neoproterozoic and was related to the Brasiliano orogeny at 0.59 Ga (Schrank and Machado 1996). The period between 2.75 and 2.60 Ga experienced a massive intrusions of potassic (K-rich) granitoids that marked the cratonization phase (Romano et al., 2013).

The deformation history of the RVGB is polycyclic, and is related to the events that occurred in the Archean and Paleo- to Neoproterozoic, which caused the reactivation of previously formed structures and the duplication or suppression of portions of the RVGB stratigraphy. Baltazar and Zucchetti (2007) subdivided the RVGB into four major tectonic domains according to the structural styles and the trends of their megascopic structures (Fig. 1C, Table 02). In each domain, a group of dominant planar and linear features — related to the four structural generations (D1, D2, D3, and D4) and three tectonic events — was mapped. The first event, D1, which is well characterized in the tectonic domain 1, developed during a compressive regime, with tectonic transport from N to S. This phase is characterized by south-vergent thrust faults and E–striking and N dipping thrust faults. In domain 1, the main structures are open to isoclinal folds with axes plunging to the ENE. The D2 structures, which also developed during the Archean, have the same characteristics as the D1 event; however, the tectonic transport is from NE to SW. The dominant structures are NW-striking thrust faults, associated with overturned, tight to isoclinal NW trending folds, verging to the SW. These structures are well characterized in tectonic domain 2, but they

are also found in other parts of the RVGB (Fig. 1D). The structures of D3 are observed in the vicinity of the Bação complex — tectonic domain 3 — and were generated in an extensional regime, whose tectonic transport was from WNW to ESE. This is characterized by the nucleation of regional synclines and by uplift of the granite-gneissic substratum as the core of the metamorphic complexes. This event has been interpreted as a response to the collapse of the Transamazonian orogen that developed on the southern margin of the São Francisco Craton at approximately 2.1 Ga and laid the foundation for the dome-and-keel architecture of the Iron Quadrangle (Alkmim, 2004; Alkmim and Marshak 1998; Table 2). In this context, the D3 event described by Baltazar and Zucchetti (2007) should also include an initial compressive phase developed in the collisional stage of the Paleoproterozoic orogen. The structures generated during D4 affect all units of the IQ and are better characterized in the tectonic domain 4. These structures were formed in a compressive regime during the Neoproterozoic event (Brasiliano), are characterized by a system of thrusts and folds with vergence from E to W and include lateral ramps in an E–W direction.

Gold Mineralization

The main gold deposits in the RVGB are regionally controlled by D2 and D4 structures - tectonic domains 2 and 4, with directions predominantly NW-SE, NE-SW, and E-W (Fig. 1D). They show different types, alteration patterns, and structural styles and have been categorized into three generic styles (Lobato et al., 1998; Table 1). The major gold producer includes the Archean greenstone-hosted stratabound, replacement-dominated and shear zone-hosted quartz-vein type gold deposits hosted by mafic and felsic metavolcanic rocks, banded iron-formations, metacherts and metasedimentary rocks (Ribeiro-Rodrigues et al., 2000; Lobato et al., 2016).

The breccia, stockwork and bedding-replacement (stratabound, replacement-dominated) deposits are associated with BIF, such as at the Cuiabá, Pilar, São Bento, Lamego and Raposos mines and another type named “lapa seca”, which is defined as a hydrothermal rock composed of carbonate, quartz, sericite, and albite that is located in the Morro Velho, Bela Fama, and Bicalho mines (Lobato et al., 1998; 2001).

The second type is the gold disseminated deposits, that is mainly located along shear zones with quartz-albite, mafic, volcanic- or sediment-hosted, sulfide-rich, and (or) potassium feldspar-carbonate replacement zones. The third type is quartz-carbonate-sulfide veins in shear zones.

The mineralization processes are related to the end of the Archean between 2.7 and 2.6 Ga, that is, late in relation to the evolution of the greenstone belt, with an age of 2.7 Ga (Machado et al., 1992), and after the greenschist facies metamorphic peak of the host rocks (Lobato et al., 2001). Recent studies in the Cuiabá mine (Silva, 2006), Córrego do Sítio (David, 2006) and Engenho D'água (Beleque, 2015), Lamego (Martins et al., 2016) have shown the existence of

remobilization and reconcentration of the Paleoproterozoic mineralization (2.0 and 2.2 Ga) and suggest other pulses in the Brasiliano (approximately 560 to 600 Ma).

Province-Camp-Scale Predictive Targeting Methodology

A conceptual fuzzy-logic model was applied to an orogenic gold system in Rio das Velhas Greenstone Belt to better represent the geological process and its footprints. The factors and indicators of the gold-ore mineralization were translated into mappable criteria using the mineral system approach at each scale (M1, M2 and M3 – Fig.1b).

Fuzzy logic was originally derived from Zadeh (1965) Fuzzy Set theory to handle modelling inaccurate and uncertain zones. This idea was later adapted by Bonham-Carter (1994) to integrate geological data. Comparing the classical set theory, the membership of a set is defined as true or false (one or zero), in fuzzy-set theory, the membership of a set is defined on a continuous scale from true. The membership function can be anything from linear to non-linear or non-continuous (Carranza and Hale 2001). In mineral exploration, the statement could be: ‘definition of favorable location for mineralization’.

Employing the fuzzy logic, all raster layers were assigned membership values of either fuzzified values from 0-1. The functions used were (Table 3): large, near and small (Bonham Carter, 1994; Carranza, 2009). The data within the raster layers were analyzed according to their spatial distribution and density and the presence of anomalous values.

Data

Geological Data

Three geological datasets were used in this research: GeoM1, GeoM2, and GeoM3. The GeoM1 is a data compilation from the Minas Gerais Economic Development Company (CODEMIG) in 2005, which resulted in the Minas Gerais Geological Map in 1:1,000,000 scale. The GeoM2, the second dataset was extracted from the Cartographic Integration and Correction Project in 1:100,000 scale, coordinated by Lobato et al., (2005). The GeoM3, is a combination between GeoM1 and GeoM2 geological dataset at 1:50,000 scale.

Satellite Gravimetric Data

A Bouguer gravity anomaly map has been obtained from the World Gravity Map (WGM2012) and were also derived from the geopotential Earth Gravitational Model EGM2008, collected and distributed by the Bureau Gravimétrique International with 2’x2’ resolution.

Airborne Geophysical Surveys

Three different airborne geophysical surveys were applied in this research: The Brazil-Germany Agreement Project (CGBA), the Rio das Velhas Project and the Aerogeophysical Survey Program of Minas Gerais (PLAMG). The CGBA was executed in the 1970’s and includes

only an aeromagnetic survey. The flight height was 350 m, with E-W tie lines being spaced every 2 km, as well as N-S control lines. This project was used for the interpolation of values where the other two main surveys do not overlap in the study area.

The Rio das Velhas Project (1992) includes magnetic, radiometric and electromagnetic data. The flight height was 60 m with a primary direction of N40°W and N50°E, line of spacing of 250 m, and N-S control lines (Silva, 1999).

The third project corresponds to area II of the PLAMG, executed between 2000 and 2001 with a flight height of 100 m, flight lines spaced every 250 m and control lines every 2,500 m. This area is divided into two blocks; the west block has flight lines oriented N30°E and control lines N60°W, and the east block has N30°W flight lines and N60°E control lines. The airborne geophysical data of Rio das Velhas were processed by Silva (1999) and the integration of the three surveys was carried out by Leão (2006).

Deposits Database

A database was compiled and contain approximately 350 items of deposits, mines and occurrences. Additionally, data were extracted from theses and dissertations, as well as public mining company reports from the study area of this research.

Geochemical Data

Geochemical data used in this study were from the Iron Quadrangle Project conducted by the Brazilian Geological Survey (CPRM) in 2015 and included both soil and stream samples. The samples were analyzed for 53 elements by inductively coupled plasma mass spectrometry, pulverized and sieved into fractions with 80 mesh (0.175 mm) and 200 mesh (0.075 mm). The sampling density for the soil survey was 1 sample per 115 km².

Methods

The evidential maps were processed according to the flowchart (Fig. 3), and divided into three groups: geophysical, geological and geochemistry datasets.

Geophysics: In the first place, we performed the interpolation of the Bouguer anomaly provided by the International Gravimetric Bureau (BGI), calculated the first vertical derivative and the analytical signal amplitude of the total magnetic intensity (TMI). We used the 4.175 Hz channel of the FDEM, converted to conductivity values as indicated by Silva (1999). Gamma-ray spectrometry was represented by the K/eTh ratio, mafic index (Pires and Moraes, 2006), F-Parameter (Efimov, 1978 apud Gnojek and Prichystal, 1985), and anomalous potassium (Kd) (Pires, 1995), which were used to map hydrothermal processes. Then, the resulting products were submitted to the cluster analysis. The algorithm selected was K-means, which is a hierarchical grouping technique proposed by MacQueen (1967). This technique defines, automatically, pixel groups of any image without the influence of prior knowledge of the area. The method groups,

pixel of color and then extracts information. Also, the supervised classification was applied, but only to the gravimetric data. The support vector machine algorithm (machine learning), determines the decision limits that minimized errors to produce the optimal separation between classes (Vapnik, 1995).

Geochemistry: Geochemical data are compositional, where the total sum of all components must add up to 100% or 1,000,000 ppm. Buccianti and Grunsky (2014) emphasized this and other considerations regarding the manipulation of geochemical data. In this work, some of the recent techniques described by Martín-Fernández et al., (2012) were used for missing values or values below the limit of detection (LDO), labeled in the literature as “Censored Data.” The nearest neighbor method for missing data described by Hron et al., (2010), where the geochemical results should be reported numerical, as suggested by Martín-Fernández et al., (2012). Therefore, samples with less than 100% detection of the geochemical composition are excluded, since these results are reported as “Na” or with other symbols. However, elimination from the database may lead to the biased exclusion of samples with low concentrations that may be important for the study. Martín-Fernández et al., (2012) propose that if an element is not detected in up to 10% of the samples, it will likely be 66% of the content below the LDO value. The authors also suggest that elements identified in 10-30% of the samples below the LDO should be considered as missing values. The LDO values, methods and equipment cited in the CPRM reports (Larizzatti et al., 2014) were checked for quality.

Since compositional data have a great variance and it is difficult to present graphically for comparison, we performed the logarithmic transformation ($\log x+1$) to standardize the data distribution. Also, we tested Z-score transformation; however, negative values were generated, which would result in floating type raster files and encumber the modelling process. Therefore, the logarithmic transformation was adopted by adding a constant of value 1.

After the data preparation, the Pearson correlation coefficient and principal analysis (PCA) were evaluated. The PCA is a sort method that reorients a database of multiple variables (Geological, Geochemical, for instance), the axis of greater variance becomes the first major component and the second largest variance axis becomes the second component (Grunsky et al., 2014). The Pearson correlation coefficient calculates the linear correlation between several elements and the result is displayed as a correlation chart. First, the PCA tool was runned for all elements. This process resulted in 10 eigenvectors, also referred to as principal component coefficients or loadings, where describes the relative significance of a component. Next, the elements were simplified to the most representative set or most significant : Cu, Fe, Ni, Mg, Th, Rb, Cs, As, Au and Sb. The Pearson correlation coefficient method was applied to identify patterns of association between the different analytical variables; from this correlation, a series of indicators related to the mineralization processes were generated. The use of Z-scores in the modelling process was tested, but the indices were more efficient in limiting the mineralization-

related patterns. The index proposed by Yeats and Vanderhor (1998), characterized by the standardized iron equation $Fe/(Fe+Mg+Ca)$, was used to map processes with significant anomalies focusing on iron rich rocks. Elements that make up the characteristic geochemical signature of orogenic deposits were used as mineralization indicators: Au, and Sb. The basic statistics of Fe, Ni, Cu, Cr, Cs, Rb, Th, Au, As and Sb contents are presented in Table 4. The histograms and box plots are displayed as logarithm ($\log+1$) values and represents some geological process such hydrothermal alteration and mineralization (Figs. 4, 5).

Geology: Some layers were simplified or refined based on the literature review (Table 5), for example, the geological layers of map units and structural lineaments.

After the processing steps, each raster was transformed to spatial evidence values within the interval zero and 1; later integrated into intermediate model layers and eventually into a final process map using a set of fuzzy operator.

Modelling

The model M1, named the RV Endowment, is shown in Fig. 6, where the dataset is referred to the scale 1:500,000. This data set data was interpolated with a grid size of 500 m. It included low-resolution data, such as gravimetric satellite and regional geologic data.

The second model, M2, maps the geological processes on a scale of 1:100,000, highlighting the different geological process that occurred in each district. The modelling steps are shown in Fig. 07. The data were interpolated with a grid size of 100 m.

The last one, M3, the data were interpolated with a grid size of 50 m, mapping process at a scale of 1:50.000 titled “Camp Scale Map”. The data used have a higher resolution and, therefore, show better detail in the favorable areas mapped at the district scale. The modelling steps are shown in Fig. 08.

The M2 and M3 models were broken down into scenarios for the deposits hosted in mafic and ultramafic rocks and the deposits hosted in BIFs, given that these rocks are the hosts with the highest potential for discovery of economic mineralization in the Rio das Velhas Greenstone Belts.

Rios das Velhas Mineral System

The identification of the main parameters that compose the RVMS is based on similar systems for orogenic gold deposits in greenstone belt environments described by Groves et al., (2000, 2003) and Goldfarb et al., (2005). In this context, the system defined by McCuaig et al., (2010) uses the following main parameters: (1) source and nature of the fluid, (2) structures that condition the trajectories of the fluids (favorable architecture and pathway), and (3) mechanisms for deposition of the ore (traps). According to these authors, the combination of these components defines the genesis of the ore and describes the mineral system.

The geological processes that may be related to the formation of the RVGB deposits are summarized in the context of geodynamic events (Fig. 2). The magmatism and deformation processes define a time window of approximately 2.7 to 2.6 Ga, which provided the energy required for the generation of mineralizing fluids acting on the fertility of the central portion of the IQ (Fig. 2B – M3 area). These fluids were transported through deep structures that were generated during D1 and D2 events and reactivated during D3 and D4 events, subsequently remaining in various stratigraphic lithologies of the RVGB and thus being preserved by the presence of chemical and physical traps. As in the Archean, later events in the Paleoproterozoic and Neoproterozoic times may have triggered the same sequence of processes and led to new mineralizing fluid pulses and/or redistributed or remobilized existing sulfides and gold (Fig. 2B).

Gold Source and Fertility

The geochemical footprint of typical orogenic mineralizing fluids is characterized by low salinity (Between 1 and 15 wt.% NaCl-equivalent) and high contents of H₂O and CO₂, with smaller amounts of CH₄ and N₂ and close to neutral pH (Ridley and Diamond, 2000). The transport of gold in these systems is accomplished by sulfur complexes. The depositional conditions occur at temperatures of 250 to 350°C and pressures between 1 and 3 kbar for mesozonal orogenic gold systems (Groves et al., 2000).

Fluid inclusion investigations available for the Raposos (Godoy, 1994), São Bento (Alves, 1995) and Cuiabá (Toledo et al., 1998; Xavier et al., 2000; Lobato et al., 2001) mines indicate NaCl values between 3 and 14% and temperatures ranging from 300 to 200°C. Ribeiro et al., (2015) studied the deposits related to the Córrego do Sítio lineament and described similar NaCl values (<8.5%) and temperatures between 330 and 400°C. All these data are compatible with the metamorphic models of the related fluids in orogenic deposits, as concluded by Lobato et al (2001).

There are many debates related to the discussion of the origin of the hydrothermal fluids and metals in orogenic gold systems, with opinions divided between a strictly metamorphic devolatilization, with a magmatic contribution (Pirajno, 2009) and/or mantle contribution (Hagemann and Cassidy, 2000). A significant question relates to whether the metals were originally mobilized from the metamorphic rocks during metamorphism, transported by metamorphic fluids and reconcentrated or deposited within shear zones that were active broadly during metamorphism. The same question remains for the RVGB case, because is not clear, due to the lack of relevant studies, as well as the geological complexity of the environment.

The magmatic contribution relies on previous work (Thorpe et al., 1984) and the recent unpublished data (Silva, 2006, Beleque, 2015). Silva's (2006) studied Pb in pyrite and pyrrhotite from the Cuiaba mine, where model ages between 2.73 and 2.56 Ga were obtained. This indicates that the mineralization occurred during the end of the Archean. This result also shows that the Pb,

Sr, Nd, and Os footprints of the ore minerals indicate that the mineralizing fluids had a heterogeneous composition, with mixtures of fluids derived from different reservoirs, especially from source rocks of the upper and lower crust, with a smaller contribution from mantle rocks. Also Beleque (2015) integrating isotopic studies (Pb, Sr, and Nd) performed at the Engenho D'Água mine and showed that the main source of the mineralizing fluid, and possibly metals, was the upper continental crust — notably the sedimentary volcanic sequences of the RVGB (Beleque, 2015).

A metamorphic devolatilization model is proposed by Lobato et al (2001), which builds on the metamorphic replacement proposed for orogenic gold deposits in Western Australia (Groves and Phillips, 1987). Lobato et al., (2001) described a low-salinity fluid, channeled through major Archean faults or shear zones, with largest gold resources associated with second-order strike-slip fault zones. These fluids interacted with RVGB succession, fostering the precipitation of hydrothermal alteration minerals and gold. Gold mineralization of BIFs seemed to have occurred in response to intensive and extensive sulfidation reactions aided by the high iron content of the BIF (Phillips, 1986).

Take in account this discussion, the conceptual model of the RVMS in this investigation considers that the mineralization is epigenetic and was formed at the end of the Archean (with various hydrothermal, sulfur and metal rich pulses and depositional peaks between 2.7 and 2.6 Ga (Silva, 2006).

In the spatial modelling - the source is represented by the contact between the iron rich rocks from the volcano-sedimentary succession and the basement. The upward filter was employed on the satellite data classified, where the classes 13 and 6 represents the basement and 14 to 19 classes represents the RVGB (Fig. 9 B). This data highlights the expression of frequency of dense units at depth, such as those rich in iron in contrast of the basement. The geological units of the RVGB in the modelling process are listed in table 5. The fuzzy relevance values vary from 0.1 to 0.95.

Percolation of Fluids (Pathway) and Favorable Architecture

The thrust faults and other transcrustal structures are significant in the context of the tectonic collision and fluid generation, as well as in the transport of fluids through the crust, as was previously recognized by Hubbert and Rubey (1961). Also, this idea is supported by Cox (1999) and Sibson (2001), who discussed these structures as focused pathways preferentially developed during deformation of areas of geologic complexity.

The understanding of these first-order or transcrustal structures is important because gold deposits are hosted in secondary structures, shear zones, or reverse faults and are associated with thrust faults and large-scale lineaments (Eisenlohr et al., 1989; Neumayr et al., 1999; Neumayr et al., 2007).

In the RVGB, important first-order regional structures are interpreted as resulting from the compressive character of deformation that arched the Rio das Velhas at 2.7 Ga (Lobato et al., 2001). Baltazar and Zucchetti (2007) considered that regional thrusts, which are related to the main gold occurrences, were generated during D2 and reactivated during later events (Paleoproterozoic and Brasiliano). These structures constitute thrust faults in the NW and NE directions or lateral ramps in an E–W direction that are spatially related to the gold deposits of Rio das Velhas (Lobato et al., 1998). An illustrative regional model describes the energy transfer process of the system between the first-order lineaments — considered here to be the thrust faults — and the second-order lineaments, the shear zones (Fig. 10). This model was elaborated on by the review of Toledo (1996) and Sales (1998) with regards to the Cuiabá-Lamego district. These structures are interpreted as pathways; that is, they define the trajectory of the fluid that formed during the regional greenschist/amphibolite facies metamorphism that affected the rocks of the greenstone belt.

The first-order structures such as the D2 and D4 thrust faults, well represented in the DOM2 and DOM4 domains (Fig. 1B and 1C), are considered pathways. Influence zones (buffers) are attributed to these lineaments, depicting the action of fluid that can percolate along the conduits for tens of kilometers (Groves et al., 2000). An example for a pathway is the São Vicent Corridor. A profile is shown in detail alongside with Au in ppm (soil geochemistry), TMI (total magnetic intensity) and Bouguer Gravity Anomaly (Fig. 11). The Au grade is not high (less than 0.08 ppb) except where the profile crosscuts the deposits, but this corridor is the one of those important zones that control the spatial distribution of deposits such Morro Velho, Bicalho, Morro da Glória, Morro São Vicente and Raposos (Fig. 1).

For the first model, a fuzzification process is used where the regional structure (D2) has a greater weight. The zone of influence extends to 2000 m. The highest relevance values > 0.9 occur for the D2 structures.

Traps and Gold Deposition

Traps are defined as the chemical and physical factors that allow precipitation and preservation at the ore deposition site (Hagemann and Cassidy, 2000; Hagemann et al., 2016). The physical traps are the structures that host the gold deposits, which reflect the movement within regional shear zones, as well as the different structural styles associated with the mineralization. These styles result from the variations in the orientation of the regional stress field and the resistance (competence) of the host rock or the contrast in competence between host rocks (Groves and Foster, 1991). The importance of the rheological contrast is shown by mineralization situated along shear zones developed along lithological contacts. Commonly, especially BIF-hosted orogenic gold deposits are associated with concordant veins thus, many ore bodies have a

grossly stratabound appearance that in the past has contributed to increasing the controversy about the "epigenetic versus syngenetic" origin (Groves and Foster, 1991).

In the RVMS, the physical traps are interpreted as secondary structures. These structures are difficult to recognize at a regional scale because it is easiest to understand them at the scale of the deposit. In some cases, at the deposit scale, the mineralization is parallel to the D2 stretching lineation, leading to a geometric disposition of the ore shoots, as previously observed by Lobato et al., (2001) and Ribeiro-Rodrigues et al., (2000) (Fig. 10).

The chemical traps function as chemical contrast, facilitating or controlling the deposition process (Fig. 10). The discharge of the mineralizing fluid that occurs in faults and shear zones in iron-rich host rocks — such as the mafic-ultramafic components and the BIFs — results in sulfidation reactions that are efficient for the gold deposition process (Cox, 1999). When interacting with the fluid, rocks that are rich in organic matter have a reducing effect, which also facilitates the gold deposition process (Phillips and Powell, 2012).

The vertical derivative map (Dz – Figs. 12 A, C) delineates hinges and shear zones and the Kernel Map represents the weight of quartz vein is more heavily (density) concentrate than others (Fig. 12 B and D).

Rio Das Velhas Endowment Model (M1)

The endowment or mineral endowment describes the spatial neighborhood relationship between resources already known and those that are unknown (USGS, 1976). This correlation can be presented as the estimate of geological resources per unit area. The result for this model is presented at a scale of 1:500,000 and highlights the central portion of the RV which also has a greater structural complexity in the map of regional lineaments (Fig. 13).

The highest fuzzy membership for the input values is > 0.9 and this is mostly displayed where the factors involved are more favorable according to the conceptual model. This is more evident in the central portion of the area, delimited by the M3 polygon (Fig. 13). The model also enhanced the area that shows the largest concentration of orogenic deposits (Fig. 1).

The province of the quadrangle has the highest gold production in Brazil, hosting world-class deposits such as Morro Velho and Cuiabá, intermediate-sized deposits (Raposos, São Bento, Passagem de Mariana), and hundreds of smaller deposits, as well as occurrences (Vial et al., 2007). The main active mines correspond to the Cuiabá-Lamego complex, the Nova Lima Sul trend, and various deposits located along the Córrego do Sítio lineament, still in the resource phase, also encompassing the former mine of São Bento. These deposits are controlled by AngloGold Ashanti and have total inferred resources of 38 Mt (AngloGold Ashanti, 2013). It should be noted that these deposits and occurrences, which are located in the central portion of the RVGB, are related to first- and second-order structures.

It must also be emphasized that the model does not map individual deposits such as those of the Cuiabá-Lamego complex but rather similar footprints. The highest values observed in the model express the combination of high fuzzy relevance values for the gravimetric data and the structures. This result also shows that it is possible to highlight patterns related to the components of the RVGB with low-resolution data such as gravimetric data.

District-Scale Model (M2)

This model was tested for two different scenarios: mafic – ultramafic (scenario 1) and BIFs (scenario 2). At the district scale, scenario 1 is represented by the parameters interaction (Fig. 14) that may define higher quality districts, that is, those containing larger deposits in terms of tonnages and grades, as observed by Phillips et al., (1996) and Dubé and Gosselin (2007). The present scenario represents gold mineralization that occurs where mafic and ultramafic rocks are host rocks, enhanced by combination with the evidence map of high-amplitude magnetic domains (Fig. 14 A). The discharge zone of the fluid in host rocks is expressed by the map of second- and third-order structures (physical traps) and the geochemical map of mafic and ultramafic rocks (chemical traps). The interaction of the fluid with these rocks also reflects the type of hydrothermal alteration. The footprint of this interaction in the case of Fe-rich rocks is the presence of intense sulfidation, expressed in the map of Fe-rich sulfides (geochemical dispersion 1). To highlight other hydrothermal alteration processes that may occur in these rocks, the map of hydrothermal alteration zones (geochemical dispersion 2) is used (Figs. 14D, E).

The best result is obtained with the gamma operator using the 0.8 criterion (Fig. 15). It can be seen that two components of the modelling are decisive in the identification of favorable areas: host rocks represented by the units of Cycle I — Morro Vermelho, Ouro Fino, and Quebra Osso. These features show the location of deposits and other similar mineralized areas, such as at Raposos and Limoeiro deposits in the Nova Lima district; the Tinguá, Carrapato, and José Fernandes deposits in the Cuiabá-Lamego district; and the Quebra Osso deposit in the district of the Córrego do Sítio lineament. It should be noted that the Juca Viera deposit is located in the Ouro Fino unit, and although the model does not identify it, it marks equivalent footprints (Fig. 1). Despite being smaller bodies, mineralization such as Carrapato and Fernandes are also of economic interest (Vial et al., 2007). In the district of the Córrego do Sítio lineament, potential areas reflecting geological processes that are spatially correlated with the Quebra Osso unit are mapped. The model indicates areas where there are various occurrences already identified by companies working in the region (Fig. 15A).

The scenario 2 reflects geological process that occur associated with BIF's. The final map is derived from the test of various fuzzy operators, in which the best result is that obtained with the gamma operator using the 0.8 criterion (Fig. 15B). The map highlights the mineral districts known

as Nova Lima, the Cuiabá-Lamego complex, the Córrego do Sítio lineament, and the São Vicente shear zone corridor.

The model of geological processes for the Nova Lima district maps shows potential areas that are similar to the Morro da Glória deposit. This deposit is spatially related to the São Vicente corridor, in which smaller bodies occur associated with quartz veins. In addition to this important structure, the Paciência lineament is mentioned, which, together with the São Vicente lineament, exerts a strong influence on the map with regards to the chemical traps geological processes in this region (Fig. 1).

In the district of the Córrego do Sítio lineament, which is a corridor formed by shear zones in the NE–SW direction, the footprints that are most favorable are associated with the Santa Quitéria unit. At this scale, areas where the iron formation were mapped in terms of thickness, the model presented greater combination of geological processes. The model emphasized districts of higher quality for gold mineralization in BIFs, where the physical traps (fold hinges, shear zones, spaced fractures, etc) and chemical traps (hydrothermal process) acted more effectively, resulting in a better ore preservation. This was observed, for example, in the districts of Nova Lima, the Cuiabá-Lamego complex, and the Córrego do Sítio lineament. The São Vicente corridor was also mapped, however, compared to the others districts, the factors that defined the high fuzzy values did not work in this case because the BIF's are featureless likely due the small scale.

Camp-Scale Model (M3)

The models are representative for both scenarios (1 and 2) given that they signal important deposits, highlight the favorability of occurrences in the exploratory research stage, and indicate new potential areas. The characteristic of these deposits is accentuated in other outputs, such as the evidence maps related to sulfidation (outflow) and reactive rocks which may also represent the mapping of the surrounding rocks, as described by Teixeira (2003).

In the scenario 1, the footprint of the host is more evident with the addition of the maps of high-amplitude magnetic domains containing low values of K, eTh, and eU. This map is derived from the output known as the mafic index (Pires and Moraes, 2006) that combines aeromagnetic data (amplitude of the analytical signal — ASA) and gamma-spectrometric data (maps of K, eTh, and eU) and that is used to highlight the footprint of rocks rich in Fe.

Geochemical dispersion 2 (outflow 2 - Figs. 8, 14), which is represented by the alkali mobility index, is enhanced by the addition of the gamma-spectrometric outputs, which highlight hydrothermal alteration processes. Finally, the frequency domain electromagnetic data (FDEM), show a shallow conductivity map, around 50 meters (Silva 1999) that reinforce the expression of other geological processes that are unanswered in the magnetometry.

The geological processes mapped at the district scale are individualized better in the block model. In the district of Nova Lima, the deposits of Raposos and Limoeiro, in addition to having

a similar footprint, have high favorability values. The geological processes that acted in the formation of the mineralization of the Córrego do Sítio lineament are also highlighted in this model and have higher fuzzy relevance (favorability) values, unlike in the M2 model. Finally, in the M3 model for the Cuiabá-Lamego district (which, in the M2 model, generally indicated few areas of high favorability), the combination of the geological processes that had influenced the formation of deposits such as Tinguá and Carrapato and the equivalent footprints of the Juca Viera is most representative (Fig. 1).

The modelling steps in scenario 2 is shown in Fig. 10B; the best output is obtained with the gamma operator using the 0.81 criterion. The footprints of different types of iron formations are itemized in this scenario. The Morro Velho, Bela Fama, and Bicalho deposits are hosted in rocks, known as *Lapa Seca*, composed of intensely hydrothermally altered quartz-carbonate, whose origin is controversial (Baltazar and Zucchetti, 2007). In the district of Cuiabá-Lamego, the BIF's are of the carbonate-sulfide type. The footprint of iron formations associated with the São Vicente corridor is also identified in the model. This structure controls important deposits such as Morro Velho, Bela Fama, Bicalho, Engenho D'Água, São Vicente, and Paciência. Finally, the deposits and occurrences in the Córrego do Sítio lineament (as is the case of São Bento) are also mapped in the model; the rocks that host these deposits are BIF's that include also interbedded carbonate-sulfide with metachert (Fig. 1).

Conclusions

The application of the mineral system approach demonstrated to be efficient, even when using low-resolution data at regional scales. At each scale, it was possible to delimit potential areas that were progressively detailed according to the resolution of the data used in each modelling process.

The results of this research resembled the exploratory stages defined by Hronsky and Groves (2008). The 1:500,000-scale model defined the most fertile parts of a metallogenic environment (endowment), in which it reduced an initial area by 63%, and indicated the central part of the RVGB as the initial extension area for the application of the exploratory program.

The M1 model indicated the influence of the deeper sources with the use of satellite gravimetric data. These zones were evident for every central portion of the RVGB. The initial area of model M2 was 4,000 km² at the scale of 1:100,000. However, the final result after the modelling reduced this to 1,400 km² and expressed the different gold mining districts that today are composed of projects already implemented by companies in the region of Nova Lima and the Córrego do Sítio lineament, for example.

The camp-scale model (M3) indicated the set of exploratory targets that should be ranked according to the best fuzzy relevance values at this point. The Iron Quadrangle is a brownfield site, for this reason the resulting potential areas it has assessed dividing it into two categories for both scenarios (mafic/ultramafic and BIFs), areas in more advanced exploratory stage

(represented in dark red) and areas in early stages (Fig. 17). The final assessment was taken considering the public data available such as companies reports, government databases, PhD and MSc theses.

In general, the fuzzy modelling process in conjunction with the mineral systems approach — known as multi-scale and multi-stage — can be used for the planning of exploratory steps or early exploration campaigns. This work began with an area of approximately 10,000 km², which was then progressively reduced to 100 km². All the decisions were made based on a conceptual model, taking into account the expression of geological processes, as well as the footprint of deposits hosted in mafic and ultramafic rocks and BIF's mapped at various scales.

Acknowledgments

We gratefully acknowledge the Brazilian Geological Survey for permitting the use of geological, geochemical and geophysical data in this research. J.C. Uchôa thanks the Coordination for Enhancement of Higher Education Personnel (CAPES) for her scholarship toward her doctoral research and Professor A.M. Silva acknowledge the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the research grant. We also thank the Laboratory of Applied Geophysics of the University of Brasília for technical support and Prof. Lydia Lobato for the contributions.

REFERENCES

- Alves, J. V., 1995, Estudo de inclusões fluidas em veios de quartzo da mina de ouro de São Bento, Santa Bárbara, Unpublished M. Sc. Thesis, Minas Gerais, Brazil, The Universidade Federal de Minas Gerais, 99p.
- Alkmim, F.F., Quade, H., Evangelista, M.T., 1988, Sobre a História da Deformação dos metassedimentos do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Unpublished Manuscript, Library of the Depto. de Geologia, Univ. Federal de Ouro Preto.
- Alkmim F.F., 2004, O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto V, Bartorelli A, Carneiro C.D.R, Brito-Neves. B.B., ed., Geologia do Continente Sul-americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio de Almeida. 1st ed., BECA, Auckland, p.17–36.
- Almeida, F.F.M., 1976, O Cráton do São Francisco. *Brazilian Journal of Geology*. v.7, p.349-364.
- Baltazar, O.F., Zucchetti, M., 2007, Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits *Ore Geology Reviews*. *Ore Geology Reviews*, v.32. p.63–103.
- Beleque, A.R.C., 2015, Estudo geocronológico e evolução metalogenéticas da mineralização aurífera do depósito Engenho D'Água Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais- Brazil. Unpublished Doctoral Thesis. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo.152 p.
- Bonham-Carter, G. F., 1994, Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Ontario, p398.
- Buccianti, A., Grunsky, E., 2014, Compositional data analysis in geochemistry: Are we sure to see what really occurs during natural processes? *Journal of Geochemical Exploration*, v.141, p1-5.
- Carranza, E.J.M., Hale, M., 2001, Geologically-constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines, *Natural Resources Research*, v.10, p.125–136.
- Carranza, E.J.M., 2009, Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, v.11. 351p.
- Cox, S.F., 1999, Deformational Controls on the Dynamics of Fluids Flow in Mesothermal Gold Systems. *Geological Society, Special Publications*, v.5, p.123-140.
- David, V. M.E., 2006, Composição isotópica de Pb, Sr e Nd da mineralização de ouro do depósito Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais: implicações na modelagem conceitual. Unpublished M. Sc. Thesis, São Paulo, Brazil, The Universidade de São Paulo, 75p.
- Dorr, J. V. N., Gair, J. E., Pomerene, J. B., Rynearson, G. A., 1957, Revista da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero: Departamento Nacional de Produção Mineral Brasil, Divisão de Fomento à Produção Mineral, v.8 31p.
- Dubé, B., Gosselin, P., 2007, Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, v.5, p.49-73.
- Eisenlohr, B.N., Groves, D.I., Partington, G.A., 1989. Crustal scale shear zones and their significance to Archaean gold mineralisation in Western Australia. *Mineralium Deposita*, v.24, p.1-8.
- Farina, F., Albert, C., Lana, C., 2015, The Neoproterozoic transition between medium- and high-K granitoids: Clues from the Southern São Francisco Craton -Brazil, *Precambrian Research*, v.266, p.375-394.
- Godoy, M.L.S., 1994, Evolução tectono-metamórfica da mineralização aurífera de Raposos – Minas Gerais. Unpublished M. Sc. Thesis, Rio Claro, Brazil, Universidade Estadual Paulista, 98p.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., Gardoll, 2001, Orogenic Gold geologic time: gold global synthesis, *Ore Geology Reviews*, v18, p1-75.
- Goldfarb, R.J., Christie, A.B., F.P., Bierlein., 2005, The orogenic gold deposit model and New Zealand: consistencies and anomalies, *Proceedings of the New Zealand Minerals and Mining Conference*, Publicity Unit, Crown Minerals, Ministry of Commerce, p. 105-114.
- Gnojek, I., Prichystal, A., 1985, A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia-Czechoslovakia, *Geoexploration*, v.23, p.491-502.
- Groves D. I., Phillips, G.N., 1987, The genesis and tectonics control on Archean gold deposits of the Western Australian shield-a metamorphic replacement model, *Ore Geology Reviews* v.2, p.287-322.
- Groves, D.I., Foster, R.P., 1991, Archaean lode gold deposits. In: Foster, R.P. ed, *Gold metallogeny and exploration*, Glasgow, Blackie & Son, p.63-103.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Knox-Robinson, C.M., Ojala, J., Gardoll, S., Yun, G., Holyland, P., 2000, Late-kinematic timing of orogenic gold deposits and significance for computer-based exploration techniques with emphasis on the Yilgarn block, Western Australia. *Ore Geology Reviews* v.17, p.1–38.
- Groves, D. I., Goldfarb, R.J., Robert, F., Hart, and C. J.R., 2003, Gold Deposits in Metamorphic Belts: Overview of Current Understanding, Outstanding Problems, Future Research, and Exploration Significance. *Economic Geology*, v.98, p.1-29.
- Groves, D.I., Condie, K.C., Goldfarb, R.J., Hronsky, J.M.A., Vielreicher, R.M., 2005, Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits. *Economic Geology*, v.100, p.203–224.
- Groves, D.I., Santosh, M., 2015, Province-scale commonalities of some world-class gold deposits: implications for mineral exploration, *Geoscience Frontiers*, v.6, p.389–399.

- Grunsky, E.C., Mueller, U.A., Corrigan, D., 2014, A study of the lake sediment geochemistry of the Melville Peninsular using multivariate methods: Applications for predictive geological mapping, *Journal of Geochemical Exploration*, v.141, p.15-41.
- Harris, D.P., 1984, *Mineral Resources Appraisal — Mineral Endowment, Resources and Potential Supply: Concepts, Methods, and Cases*, Oxford, Oxford University Press, p.445.
- Hagemann, S.G., Cassidy, K.F., 2000, Archean orogenic lode-gold deposits. In: Hagemann, S.G., Brown, P.E. eds, *Gold in 2000: Reviews in Economic Geology*, v.13, p.9–68.
- Hagemann, S.G, Lisitsin, V.A., Huston, D.L., 2016, Mineral System Quo Vadis, *Ore Geology Reviews*, v76, p.504–522.
- Hronsky, J.M.A., Groves, D.I., 2008, Science of targeting. Definition, strategies, targeting and performance measurement, *Australian Journal of Earth Sciences*, v.55, p.3-12.
- Hronsky, J.M.A., Groves, D.I., Loucks, R.R. Beggs, G.C., 2012, A unified model for gold mineralisation in accretionary orogens and implications for regional-scale exploration targeting methods. *Mineral. Deposita*, v.47, p.339–358
- Hron, K.; Templ, M. Filzmoser, P., 2010, Imputation of missing values for compositional data using classical and robust methods, *Computational Statistics and Data Analysis*, v.54, p.3095-3107.
- Hubbert, M.K., Rubey, W. W., 1961, Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting; reply to discussion, *Geological Society of America Bulletin*, v. 72, p.1445-1451.
- Lana, C., Alkmim, F.F., Armonstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini Jr. and H.R., 2013, The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, Southeast Brazil, *Precambrian Resource*, .v.231, p. 157–173.
- Larizzatti, J. H., Marques, E. D., Silveira, V. F., 2014, Mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno. Informe de recursos minerais, Série metais, CPRM, Rio de Janeiro, p.208 .
- Leão, M. H. S., 2006, *Processamento, Nivelamento e Integração de Levantamentos Aerogeofísicos Magnetométricos no Estado de Minas Gerais e sua Contribuição à Geologia da Porção do Sul do Cráton São Francisco*. Unpublished M. Sc. Thesis, Brasília, Brazil, The Universidade de Brasília, p.157.
- Lowe, D.R., 1994, Archean greenstone-related sedimentary rocks. In: Condie, K.C. eds, *Archean Crustal Evolution*, Elsevier, Amsterdam, p. 121–169.
- Lobato, L.M.; Vieira, F.W.R.; Ribeiro-Rodrigues, L.C.; Pereira, L.M.M.; Menezes, M.G.; Junqueira, P.A., Pereira, S.L.M., 1998, Styles of hydrothermal alteration and gold mineralizations associated with the Nova Lima group of the Quadrilátero Ferrífero: Part I, description of selected gold deposit. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, p. 339-354.
- Lobato, L.M., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Costa, M.N.S., Lehne, M. M.E.; Alves, J.V., Tassinari, C.C.G.; Vieira, F.W.R.; Biasi, E.E.; Silva, R.C.F., Pereira, C.A. Noce, C.M., 2001, Depósito de Ouro Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, In: Hard, J., Brod, J.A., Queiroz, E.T., eds, *Caracterização de depósitos auríferos em distritos mineiros brasileiros*. Brasília, DNP/ADIMB, p. 3-77.
- Lobato, L.M; Costa, M. A. Hageman, G. S. Martins, R., *Ouro no Brasil: principais depósitos, produção e perspectivas in Melfi, A., J. Misi, A. Campos, D. A. Cordani, U. G., 2016, Recursos Minerais no Brasil Problemas e Desafios, ed. Academia Brasileira de Ciências, 420p.*
- Machado, N., Noce, C.M., Ladeira, E.A., Belo de Oliveira, O.A., 1992, U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. *Geological Society of America* v. 104, p. 1221-1227.
- McCuaig, T.C., Beresford, S., Hronsky, J., 2010, Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system, *Ore Geology Reviews*, v. 38, p. 128-138.
- MacQueen, J. B., 1967, *Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations*, Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press, v. 1, p. 281-297.
- Marshak, S., Tinkham, D., Alkmim, F. F., Brueckner, H. Bornshorst, T., 1997, Dome-and-keel provinces formed during Paleoproterozoic orogenic collapse - core complex, diapirs, or neither?: examples from the Quadrilátero Ferrífero and the penokean orogen, *Geology*, v. 25, p. 145-418.
- Machado, N., Carneiro, M.A., 1992, U-Pb Evidence of late Archean Tectono-Thermal Activity in the Southern São Francisco Shield, Brazil. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 29 p. 2341-2346.
- Machado, N., Schrank, A., Noce, C.M., Gauthier, G., 1996, Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 141, p.259-276.
- Martins, S. B., Lobato, M.L, Rosière, A.C., Hagemman, S., Santos, S. O. J., Villanova, P.S.L.D., 2016, The Archean BIF-hosted Lamego gold deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero: Evidence for Cambrian structural modification of an Archean orogenic gold deposit, *Ore Geology Reviews*, v. 72, p. 963-988.
- Martin-Fernandez, J.A., Hron, K., Templ, M., Filzmoser, P, Palarea-Albaladejo, J., 2012, Model-based replacement of rounded zeros in compositional data: Classical and robust approaches. *Computational statistics and Data Analysis*, v56, p.2688-2704.
- Neumayr, P., Hagemann, S.G., Couture, J. F., 1999, Structural setting, textures, and timing of hydrothermal vein systems in the Val d'Or camp, Abitibi, Canada: Implications for the evolution of transcrustal, second- and third-order fault zones and gold mineralization: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 37, p. 95–114.
- Neumayr, P. Hagemman, S. G, Banks, D. A, Yardley, B. W.D. Couture, J. F., Landis, G. P, Rye, R., 2007, Fluid Chemistry and Evolution of Hydrothermal Fluids in an Archean Transcrustal Fault Zone Network: the Case of the Cadillac Tectonic Zone, Abitibi Greenstone Belt, Canada: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 44, p. 745-773.

- Noce, C.M., Machado, N., Teixeira, W., 1998, U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero- Southern São Francisco Craton: age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, p. 95-102.
- Noce, C.M., 2000, Geochronology of the Quadrilátero Ferrífero: a review. *Geonomos* v7, p. 15–23.
- Pires, A. C. B., 1995, Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, p. 61-68.
- Pires A.C.B., Moraes, R.A.V., 2006, New processing technologies applied do airborne geophysical data: impact on interpretation. In: 2º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, Ouro Preto, MG.
- Pirajno F., 2009, *Hydrothermal processes and mineral systems*, Springer, Berlin, p. 1250.
- Phillips, G.N., 1986, Geology and alteration in the Golden Mile Kalgoorlie, *Economic Geology*, v81, p. 779-808.
- Phillips, G.N., Groves, D.I., Kerrich, R., 1996, Factors in the formation of the giant Kalgoorlie gold deposit *Ore Geology Reviews*, v10, p. 295–317.
- Phillips, N.G., Powell, R., 2012, Origin of Witwatersrand gold: a metamorphic devolatilization-hydrothermal replacement model, *Applied Earth Science*, v.120, p.112-129.
- Ribeiro-Rodrigues L.C., 1998, Gold mineralization in Archean banded iron formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - The Cuiabá Mine. Doctoral Thesis, RWTH Archean, Germany, *Aachener Geowissenschaftlich*, 264p.
- Ribeiro-Rodrigues, L.C. Günther, F. Lobato, M. L. Dunquini, Jaime, Vieira, F. W.R., 2000, Gold Mineralization in the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais. *Zeitschrift Für Angewandte Geologie*, p. 143-153.
- Ribeiro, Y., Figueiredo, S.R.C. Lobato, L.M, Lima, L.C, Rios, F.J, Hagemann, S.G., Cliff, J., 2015, Fluid inclusion and sulfur and oxygen isotope studies on quartz-carbonate-sulfide veins of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio gold lineament, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, *Ore Geology Reviews*, v. 67, p. 11-33.
- Romano, R., Lana, C., Alkmim F.F., Stevens, G., Armstrong, R., 2013, Stabilization of the southern portion of the São Francisco craton SE Brazil through a long-lived period of potassic magmatism, *Precambrian Research*, v. 224, p. 43-159.
- Sales, M., 1998, The geological setting of Lamego iron formation-hosted gold deposit, Quadrilátero Ferrífero district-Minas Gerais-Brazil, University of Queens, Hamilton, Canadá. M. Sc. Thesis. 182p.
- Schrank, A., Machado, N., 1996, Idades U-Pb em monazitas e zircões do Distrito Aurífero de Caeté da mina de Cuiabá e do depósito de Carrapato - Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, 39st Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú, v6, p. 473-475.
- Silva, A.M., 1999. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Universidade de Brasília, Doctoral Thesis, Brasília, Brazil, 195p.
- Silva, C.M.G., 2006, Aplicação de isótopos radiogênicos da mineralização da Mina Cuiabá, Greenstone Belt Rio das Velhas Minas Gerais, Universidade de São Paulo, Doctoral Thesis. São Paulo, Brazil, 138 p.
- Sibson, R.H., 2001, Seismogenic framework for hydrothermal transport and ore deposition, in Richards, J.P., Tosdal, R.M., eds, *Structural controls on ore genesis*, *Reviews in Economic Geology*, v. 14, p. 25–50.
- Schorscher, H.D., 1976, Polimetamorfismo do Pre-Cambriano na Região de Itabira, Minas Gerais, Abstracts, 290 Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto, p.194- 195.
- Schorscher, H.D, 1978, Komatititos na estrutura Greenstone Belt Serie Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Abstracts, 30st Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, p.292-29.
- Teixeira, W., Carneiro M.A., Noce C.M., Machado N., Sato, K., Taylor, P.N., 1996, Pb, Sr and Nd isotope constrains on the Archean evolution of gneissic granitoid complexes in the southern São Francisco Craton, Brazil, *Precambrian Research*, v78, p.151-164.
- Teixeira, A.M., 2003, Integração de Dados Multi-fontes para Exploração de Ouro no Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Brasília, Brazil, M. Sc. Thesis, The Universidade Brasília, 180p.
- Toledo, C. L.B., 1996, Controle estrutural da mineralização aurífera na mina de Cuiabá, setor noroeste do Greenstone Belt, Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero- Minas Gerais, Campinas, Brazil, M. Sc. Thesis, Universidade de Campinas, p.166
- Toledo, C. L.B, Xavier, R., Schrank, A., Rosa, M. L., Silva, D, 1998, The fluid-carbonaceous matter interaction and the deposition of gold at Cuiabá Mine - SE Brazil, 40st Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, p177.
- Thorpe, R.I, Cummings, G.L, Kristic, D., 1984, Lead isotope evidence regarding the age of gold deposits in the Nova Lima district- Minas Gerais, *Revista Brasileira de Geociências*, v 14, p. 147-152.
- U.S. Geological Survey and U.S. Bureau of Mines, 1976, Principles of the Mineral Resource Classification System of the U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey, U.S. Geological Survey Bulletin 1450-A. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
- URL data: Australia Geological Survey, Witt, W.K., Ford, A., Hanrahan, B., and Mamuse, A., 2013, Regional-scale targeting for gold in the Yilgarn Craton: Pt 1 of the Yilgarn Gold Exploration Targeting Atlas. GSWA Report 125. URL: <http://www.dmp.wa.gov.au/4726.aspx>.
- Wyman, D.A, Cassidy, K.F., and Hollings, P., 2016, Orogenic gold and the mineral systems approach: Resolving fact, fiction and fantasy, *Ore Geology Reviews*, v78, p. 322–335.
- Wylborn L.A.I, Heinrich C.A, Jaques A.L., 1994, Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. In: Hallenstein PC, ed, *Australian mining looks north – the challenges and choices*. Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, v5, p109-115p.

- Vapnik, V., 1995, *The Nature of Statistical Learning Theory*, New York, ed. Springer-Verlag, 187p.
- Vial, D; Groves, D.I.; Cook, N. J. Lobato, L. M., 2007, Special issue on gold deposits of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, *Ore Geology Reviews*, v 32, p469-470.
- Xavier, R. P; Toledo, C. L. B., Taylor, Bruce., Schrank, A, Vieira, F. W. R., 2000, Fluid evolution and gold deposition at the Cuiabá mine SE Brazil: fluid inclusions and stable isotope geochemistry of carbonates. In: 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Yeats, C. J., Vanderhor, F., 1998, Archaean lode-gold deposits, *Journal of Australian geology & Geophysics*, v 17, p. 253-258.
- Zadeh, L.A., 1965, Fuzzy Sets, *Information and Control*, v 8, p. 338-353.

Table 1. Generic Mineralization types in the Rio das Velhas Greenstone Belt Hosted in BIF, Mafic and Volcaniclastic Rocks (Ribeiro-Rodrigues et al., 2000; Lobato et al., 1998 2001; Vial et al., 2007).

Depoist Type	Host Type	Deposit Name	Sulfide	Alteration Type	Contained Gold (t Au)
1) Breccia, stockwork and bedding-replacement (stratabound, replacement-dominated)	Lapa seca BIF and chert	Morro Velho, Bicalho, Bela Fama Cuiabá, São Bento, Raposos, Faria, Lamego, Esperança III, Morro da Glória	Pyrite, pyrrhotite	Sulfidation, silicification, chloritization and albitization.	>470
2) Shear-zone hosted, replacement-dominated	Volcaniclastic Rocks	Córrego do Sítio	Pyrite, arsenopyrite	Sulfidation, sericitization chloritization and carbonization.	>300
3) Quartz-carbonate-sulfide vein in shear zone	Volcanic Mafic	Juca Vieira, Pari, Cuiabá, Tinguá	Arsenopyrite, pyrrhotite, pyrite	Sulfidation, silicification, and chloritization.	>1

Table 2. Comparison of Tectonic Framework between Alkmim and Marshak (1998), Baltazar and Zucchetti (2007)

Age (Ma)/ Event	Baltazar and Zucchetti (2007)	Alkmim and Marshak (1998) Transport /Structures
2.8-2.7 Ga - Jequié Archean (D1)	Regime Compressive, N to S, E-striking, S-verging thrust faults, S-vergent tight to isoclinal folds, with ENE-plunging, axes and open, flexural folds.	The previous crystalline rocks older than 3.2 Ga served as basement of GBRV
2.7 Ga - Archean (D2)	Regime Compressive, NE to SW, NW-striking thrust faults, NW trending, SW-verging tight to isoclinal folds	2.6–2.7 Ga intermediate plutonism After 2.6-2.4 formation of the Minas Basin
2.1-1.9 Ga - Transamazonian Paleoproterozoic (D3)	Regime Extensive, WNW to ESE NS-striking, W-verging thrusts, W-verging tight to isoclinal folds and open Stretching and mineral lineation plunging towards ESE, Uplift of granite–gneissic basement as metamorphic, core complexes	2.1 Ga northwest-verging thrusting and folding (D ₁) 2.095 Ga Orogenic collapse (D _c) Dome-and-Keel 1.75 Ga Formation of the Espinhaço rift basin Intrusion diabase Dikes
	-	0.9–1.0 Ga Renewed extension Espinhaço Belt
0.6-0.5 Ga - Brasiliano Neoproterozoic (D4)	Regime Compressive, E to W, NS-striking, W-verging thrusts W-verging tight to isoclinal folds and open, normal folds Stretching and mineral lineation plunging towards ESE	0.7–0.45 Ga Brasiliano (D2) west-verging thrust belt.

Table 3. Fuzzy Operators

Operator Fuzzy	Description	Equation
<i>Fuzzy And</i>	The MIN is an arithmetic function that selects the smallest value among a number of input values.	$=Min(\mu A, \mu B, \mu C...)$
<i>Fuzzy Or</i>	The MAX is an arithmetic function that selects the largest value among a number of input values.	$=Max(\mu A, \mu B, \mu C...)$
<i>Fuzzy Algebraic product</i>	The output is less than or equal to the lowest fuzzy score at every location.	$= \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$
<i>Fuzzy Sum Algebraic</i>	The output fuzzy score and μ_i represent the input fuzzy evidential scores at a location in i ($=1, 2 \dots n$) evidence maps.	$= 1 \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$
<i>Fuzzy Gamma</i>	This operator is a combination of the fuzzy algebraic product and the fuzzy algebraic sum.	$= \left(\prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^{1-y} = \left(\prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^{1-y}$

Table 4. Summary Statistics of Available Concentration Data

<i>Variable</i>	<i>Mean</i>	<i>StDev</i>	<i>Minimum</i>	<i>Q1</i>	<i>Median</i>	<i>Q3</i>	<i>Maximum</i>
<i>FeO₂ %</i>	8.9	8.7	0.6	3.2	6.1	11.3	39.4
<i>Ni ppm</i>	45.7	61.2	0.3	4.9	22.0	63.8	288.8
<i>Cu ppm</i>	35.0	33.4	0.6	9.4	25.2	53.7	172.6
<i>Cr ppm</i>	199.2	562.9	1.7	20.6	81.1	220.0	6076.9
<i>Cs ppm</i>	0.8	1.3	0.0	0.1	0.4	1.0	7.6
<i>Rb ppm</i>	5.2	8.1	0.1	0.9	2.6	5.8	51.6
<i>Th ppm</i>	8.6	10.0	0.2	3.2	5.1	11.0	74.7
<i>Au ppb</i>	15.1	91.4	0.1	0.6	1.8	4.4	981.9
<i>As ppm</i>	29.9	50.2	0.1	3.6	15.7	31.0	365.9
<i>Sb ppm</i>	3.4	11.0	0.0	0.2	0.9	2.0	80.8

Table 5. Simplified Geology used as evidential map for the modelling steps.

<i>RVGB CYCLES</i>	<i>Description</i>
<i>CYCLE I</i>	Komatiite with spinifex, BIFs Metabasals, BIFs, Talc Schist.
<i>CYCLE I</i>	Chlorite schist, BIFs, Metachert, Carbonaceous Schist.
<i>CYCLE II</i>	Chlorite Schist, BIFs, Metachert, Carbonaceous Schist.
<i>CYCLE III</i>	Sericite-qtz schist, Metapyroclastica, BIFs, Dolomite-Schist (Lapa Seca).
<i>CYCLE II</i>	Chlorite schist, Phyllite, Carbonaceous Schist; BIFs.
<i>UNDIVIDED GBRV</i>	BIFs.

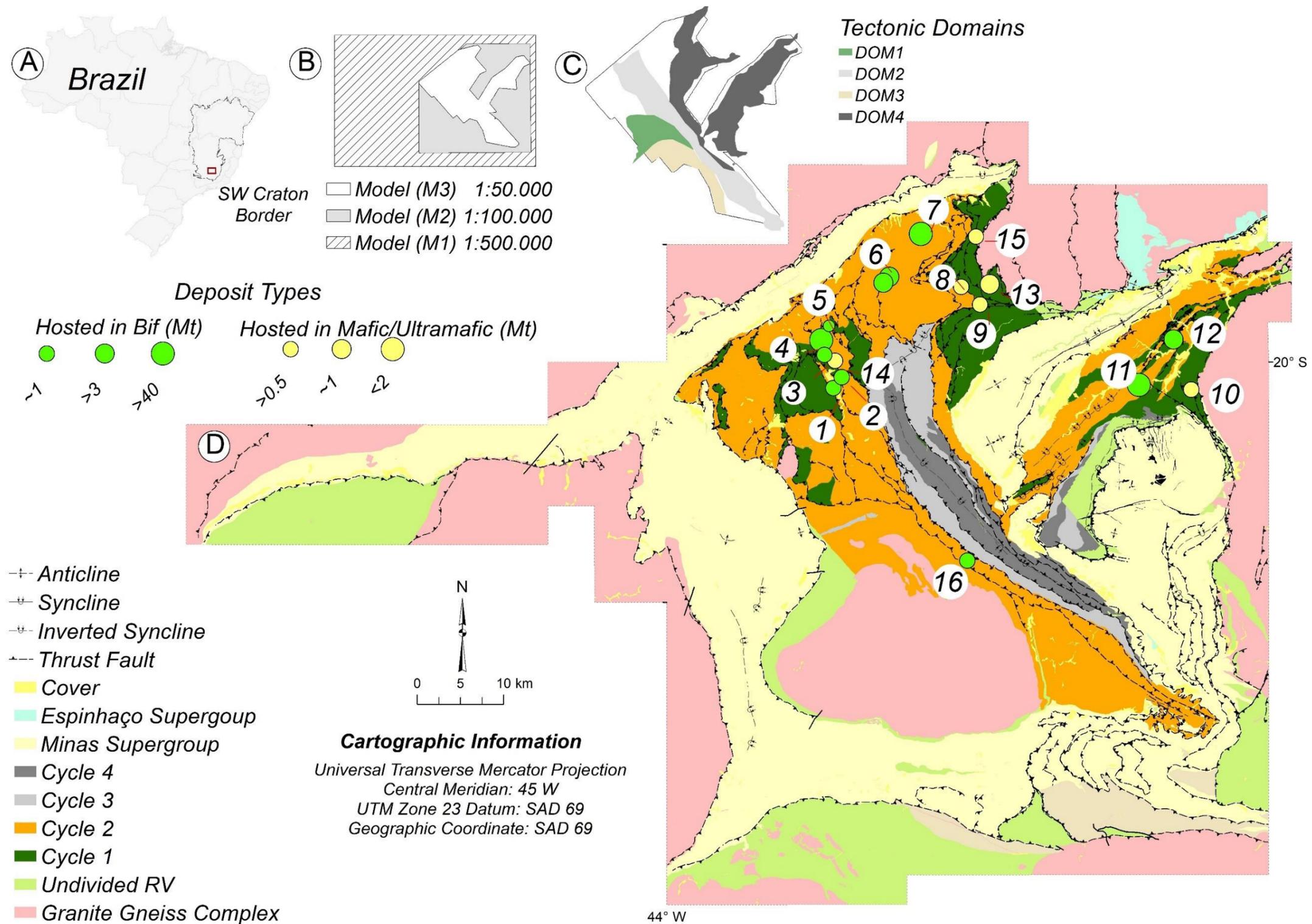


Fig. 1. (A) Brazil; (B) The modelling areas of M1, M2 and M3. (C) Tectonic domains (DOM1 to DOM4). (D) Regional geological context of the RVGB according to Baltazar and Zuchetti (2007) and spatial distribution of main deposits hosted in BIF, mafic and ultramafic rocks classified by tonnage. Deposits Names: 1 Morro da Glória, 2 Bicalho, 3 Bela Fama, 4 Morro Velho, 5 Raposos, 6 Lamego, 7 Cuiabá, 9 Carrapato, 10 Quebra Osso, 11 Córrego do Sítio, 12 São Bento, 13 Juca Vieira, 14 Limoeiro, 15 José Fernandes and 16 Mina Morro São Vicente.

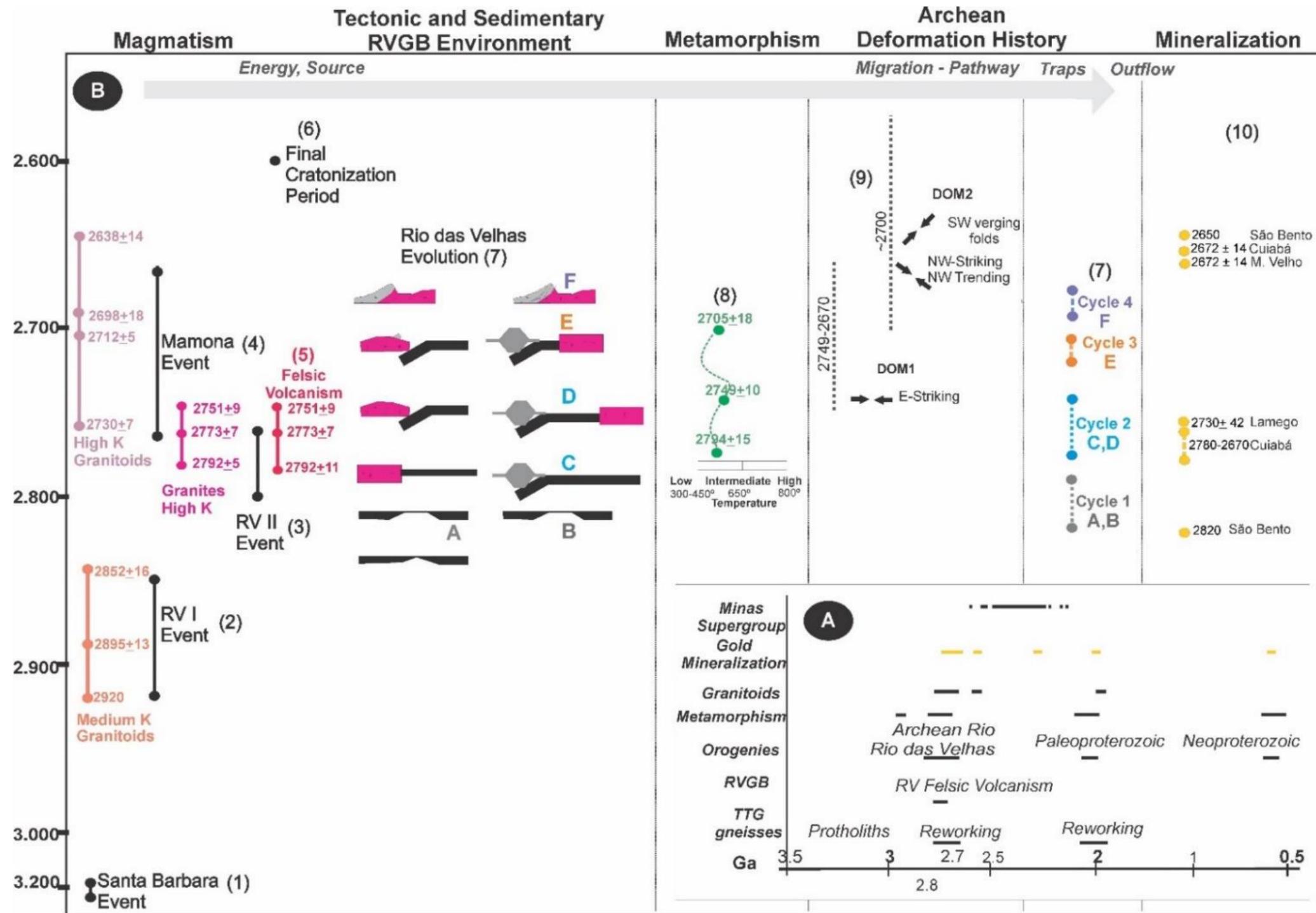


Fig. 2. Geodynamic framework of the RVGB (Event Chart). (A) Detail of geological events in the Archean. (B) Summary of geological events: Magmatic events (1 Lana et al., 2013; 2 Lana et al., 2013, Farina et al., 2015, 3 Farina et al., 2015, 4 Romano et al., 2013, Farina et al., 2015; 5 Machado et al., 1992, 1996; Noce et al., 2005; 6 Final cratonization period Romano et al., 2013; 7 Rio das Velhas Evolution Baltazar & Zucchetti 2007); 8 Metamorphism (Farina et al., 2015 Farina et al., 2015); 9 Deformation (Baltazar and Zucchetti, 2007; Alkmim, 2004; Marshak et al., 1997); 7 Tectonics and sedimentation of the RVGB (Baltazar and Zucchetti 2007) and 10 Gold mineralization (Noce et al., 2005, Lobato et al., 2007, Martins et al., 2017).

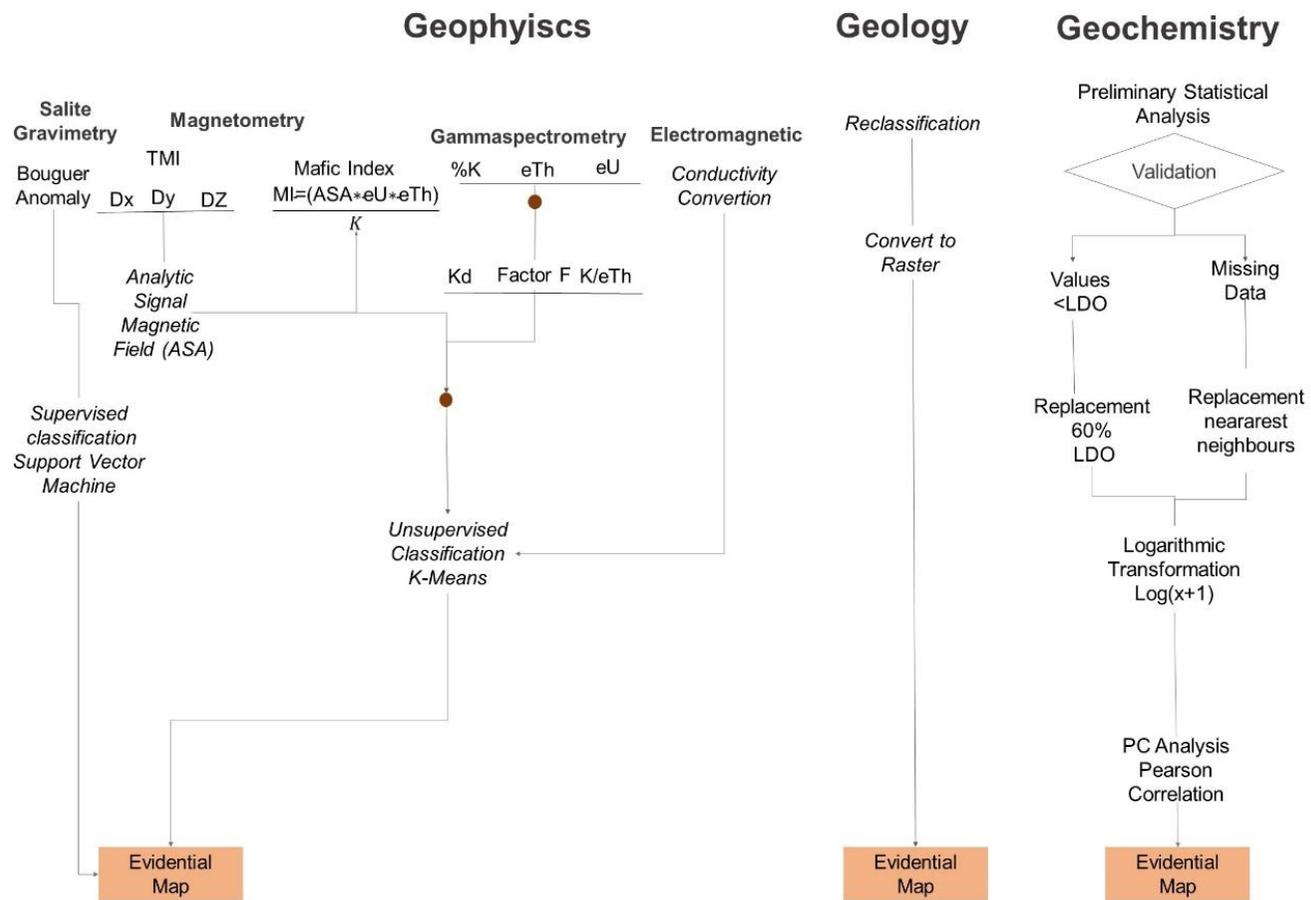


Fig. 3. Flowchart showing the steps for Geophysical, Geological and Geochemistry data processing.

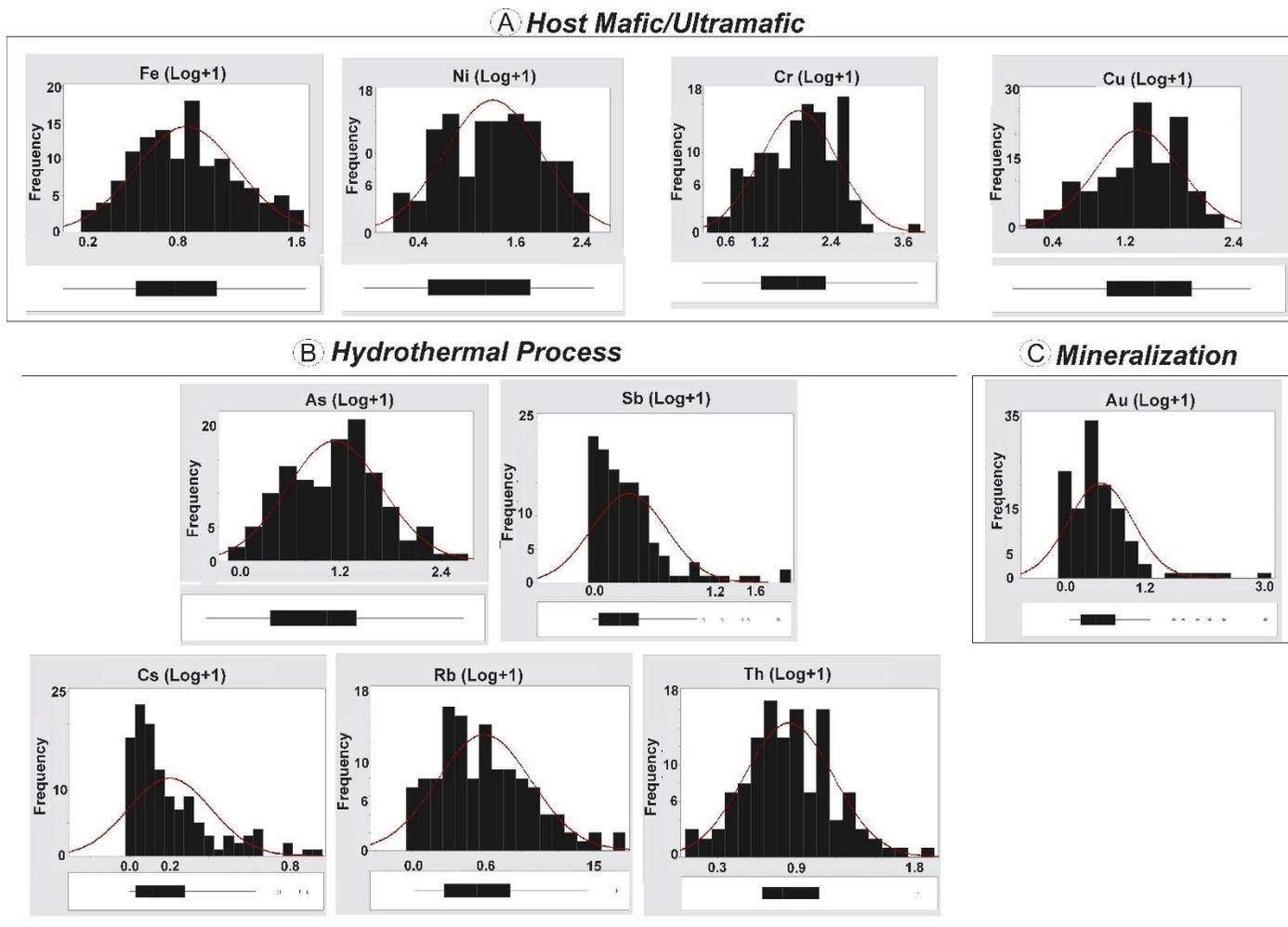
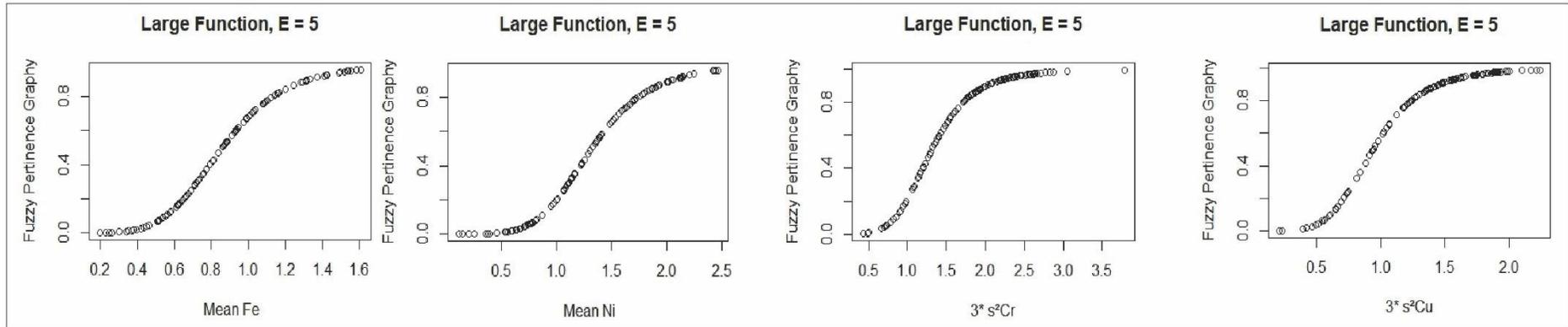
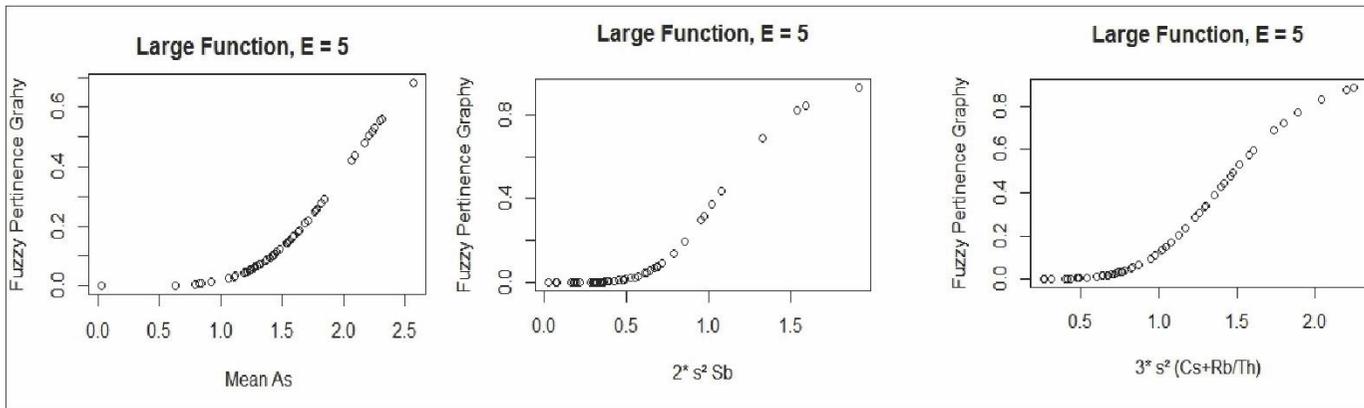


Fig. 4. Histogram of: (A) host rock (Fe, Ni, Cr and Cu); (B) hydrothermal (As, Sb, Cs, Rb, Th), and (C) mineralization process (Au).

A *Host Mafic/Ultramafic*



B *Hydrothermal Process*



C *Mineralization*

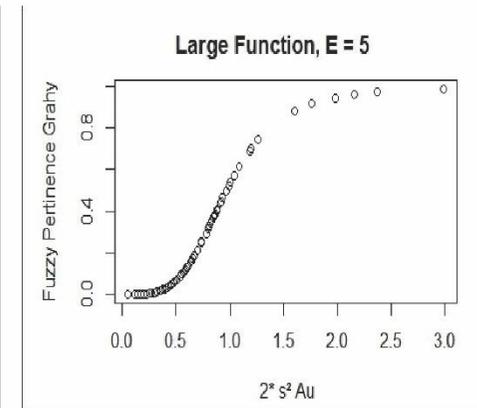


Fig. 5. Large fuzzification using spread of 5 - host rock (Fe, Ni, Cr and Cu); Hydrothermal (As, Sb, Cs, Rb, Th) and Mineralization process (Au).

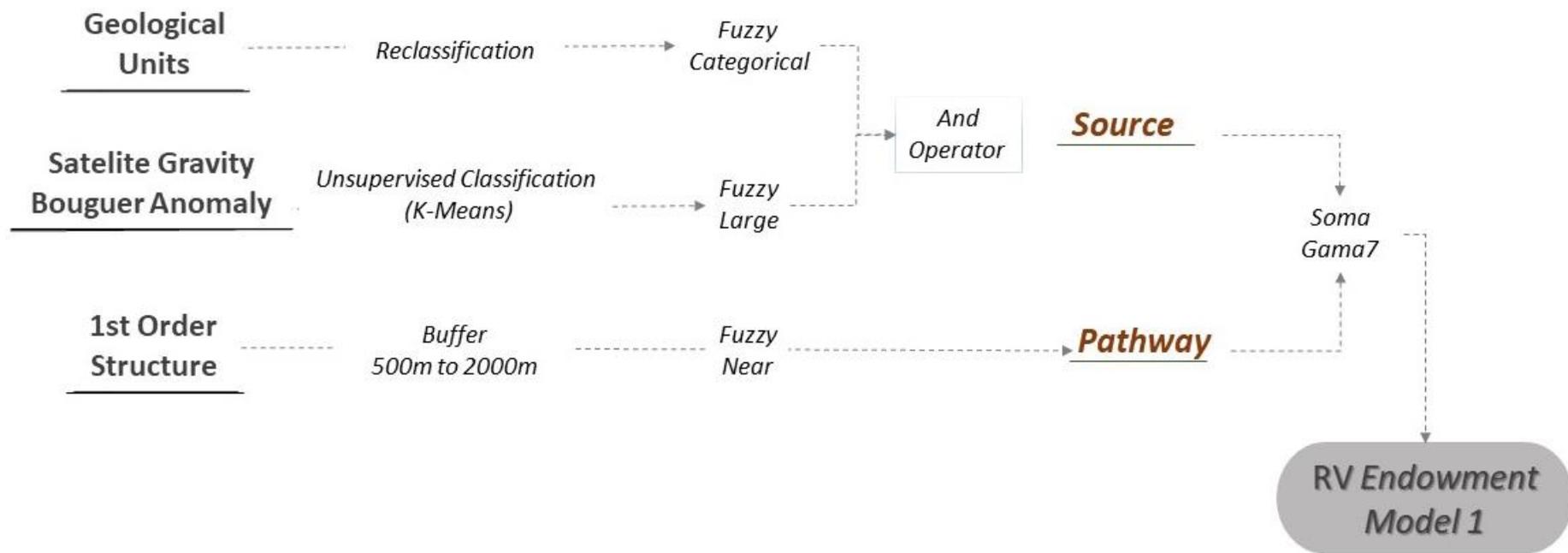


Fig. 6. RV Endowment Workflow (M1).

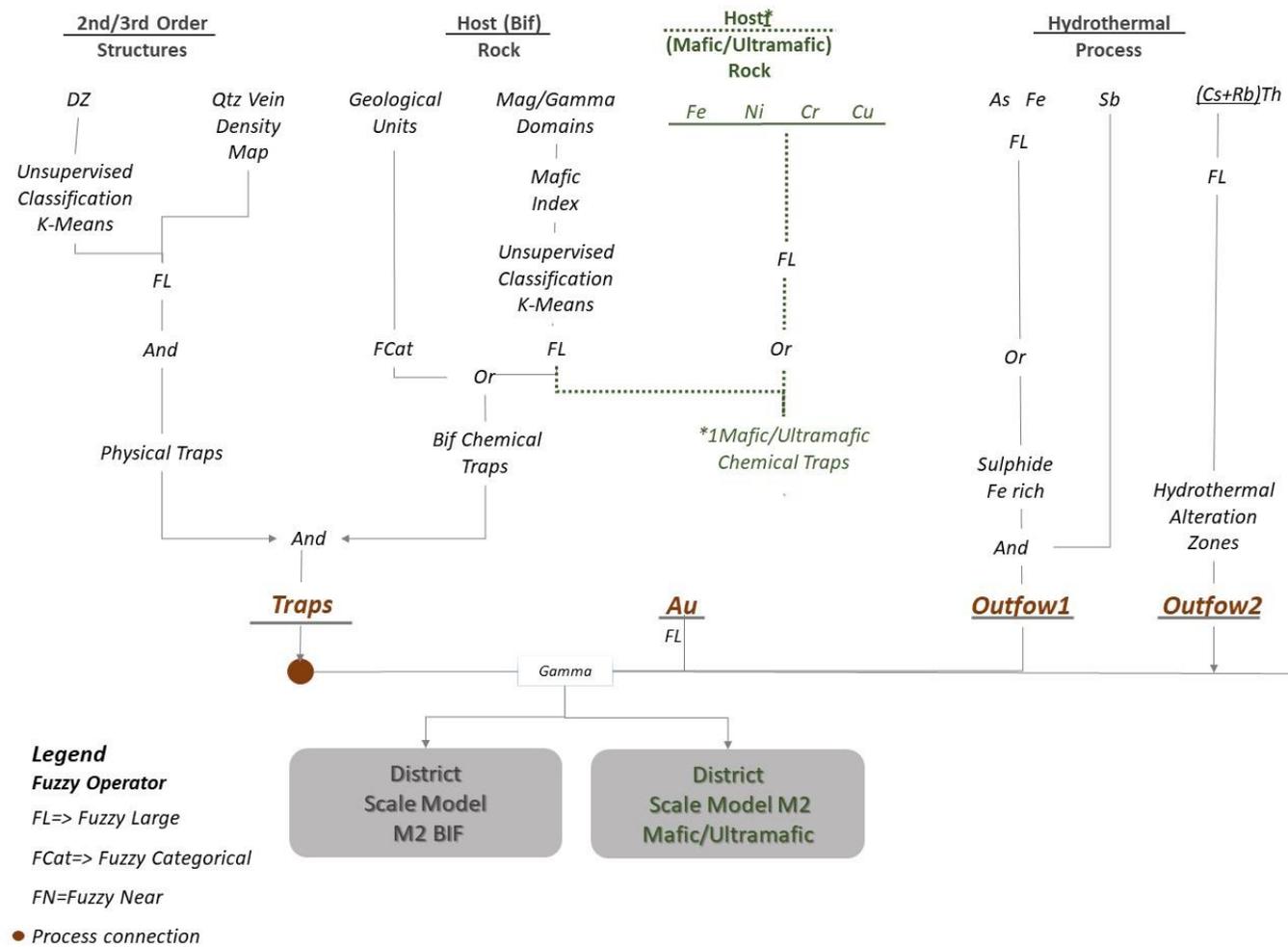


Fig. 7. District-Scale Workflow (M2)

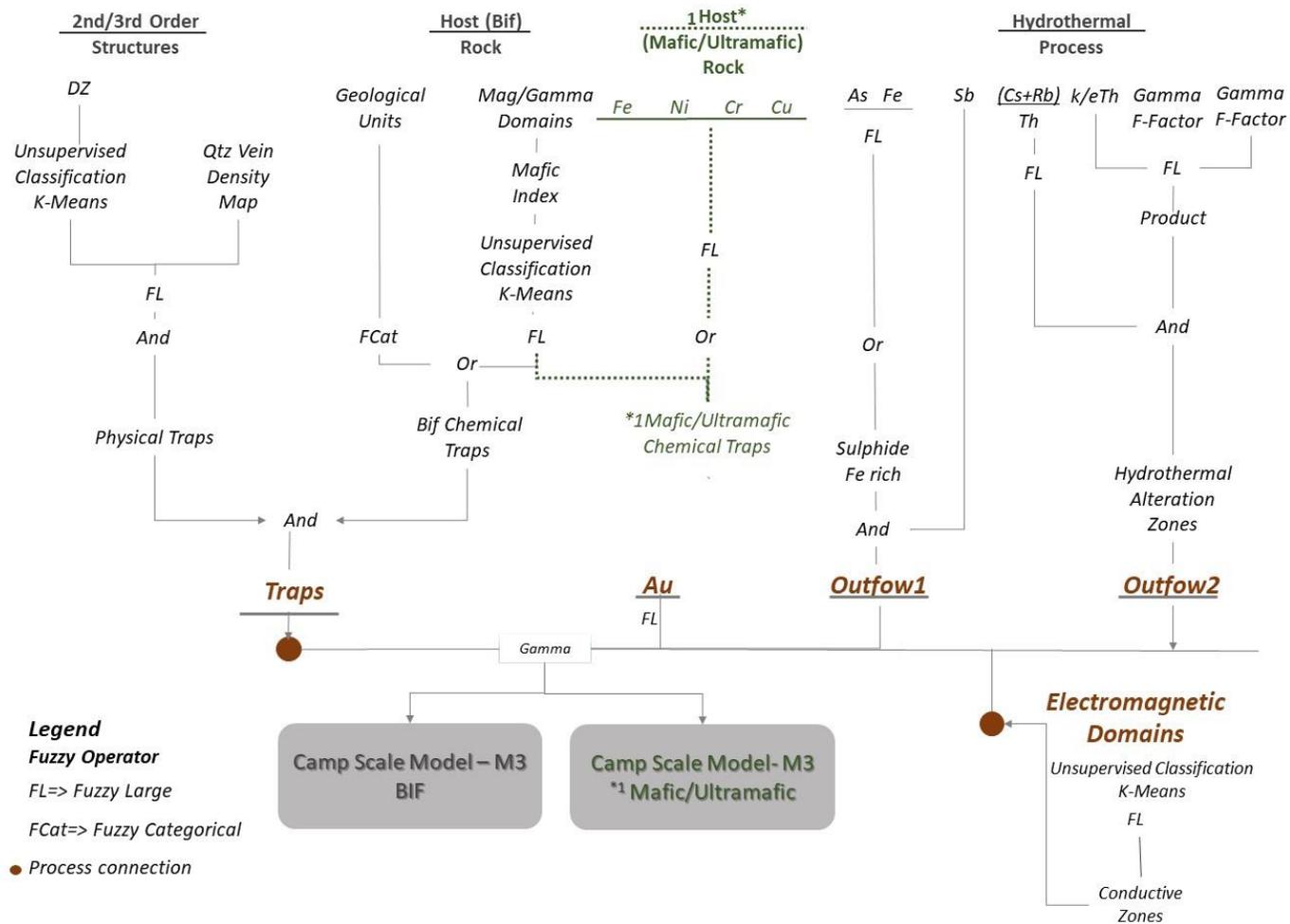


Fig. 8. Camp-Scale Workflow (M3)

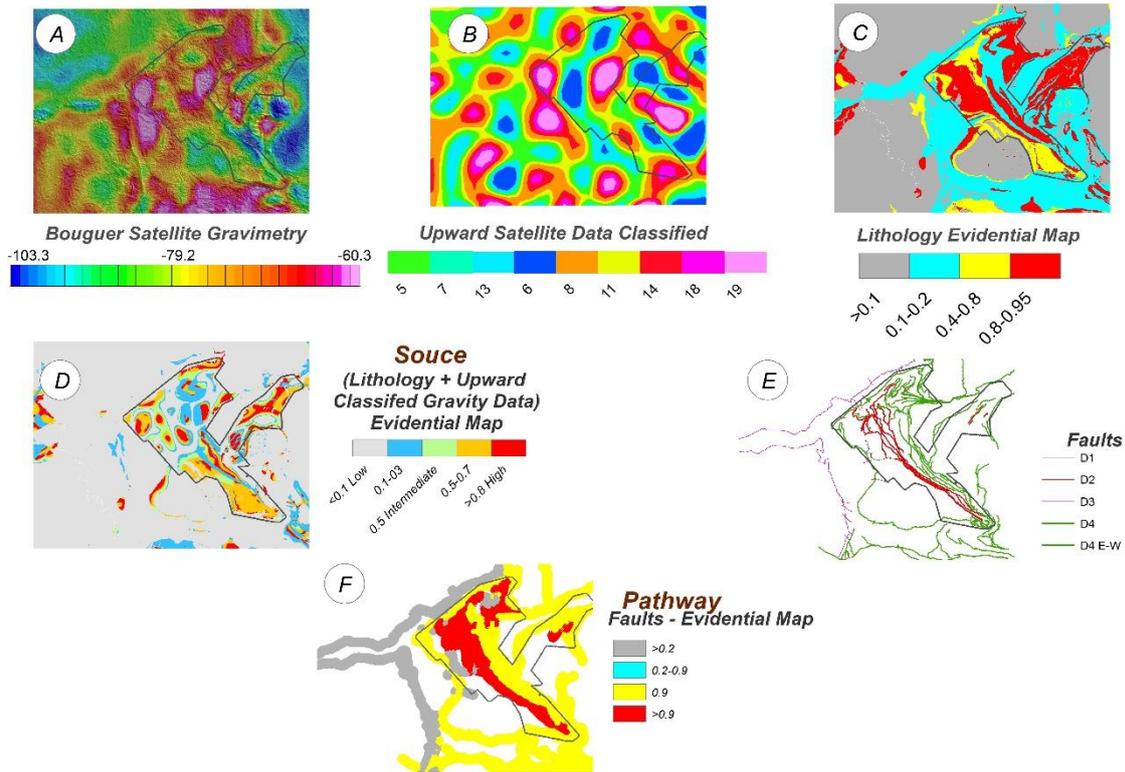


Fig. 9. (A) Bouguer Satellite Gravimetry Map showing the central part of RVGB (M3 polygon in Black). (B) The upward filter application to Satellite data (20 km). (C) Lithological map fuzzified. (D) Source Evidential Map- combination of lithology and upward classified data. (E) Main structures in RVGB according to Tectonic Domains (D1 till D4). (F) Pathway Evidential Map.

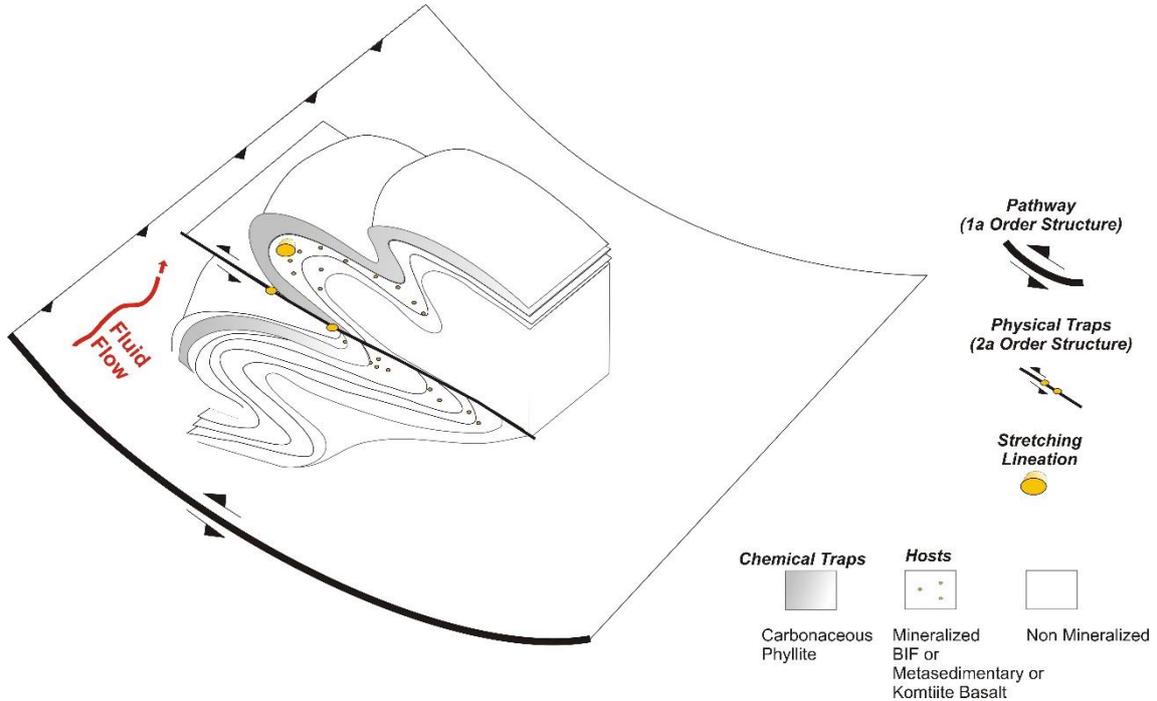


Fig. 10. Schematic regional model illustrating the transference process between the first-order structure (Transcrustal) and second-order (shear zones) and percolation of the mineralizing fluids based on Toledo (1996) and Sales (1998).

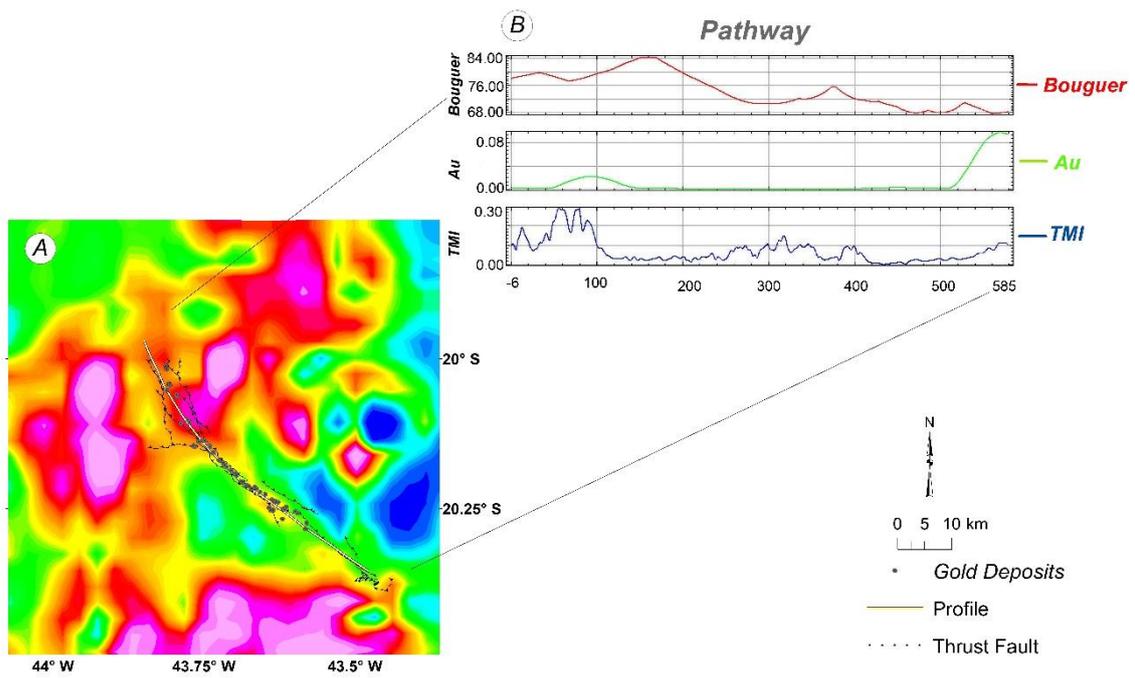


Fig. 11. (A) RV Bouguer Anomalies Map showing the profile localization and the São Vicente Corridor. (B) Profile of Bouguer anomalies, Au (ppm) and TMI (Total Magnetic Intensity).

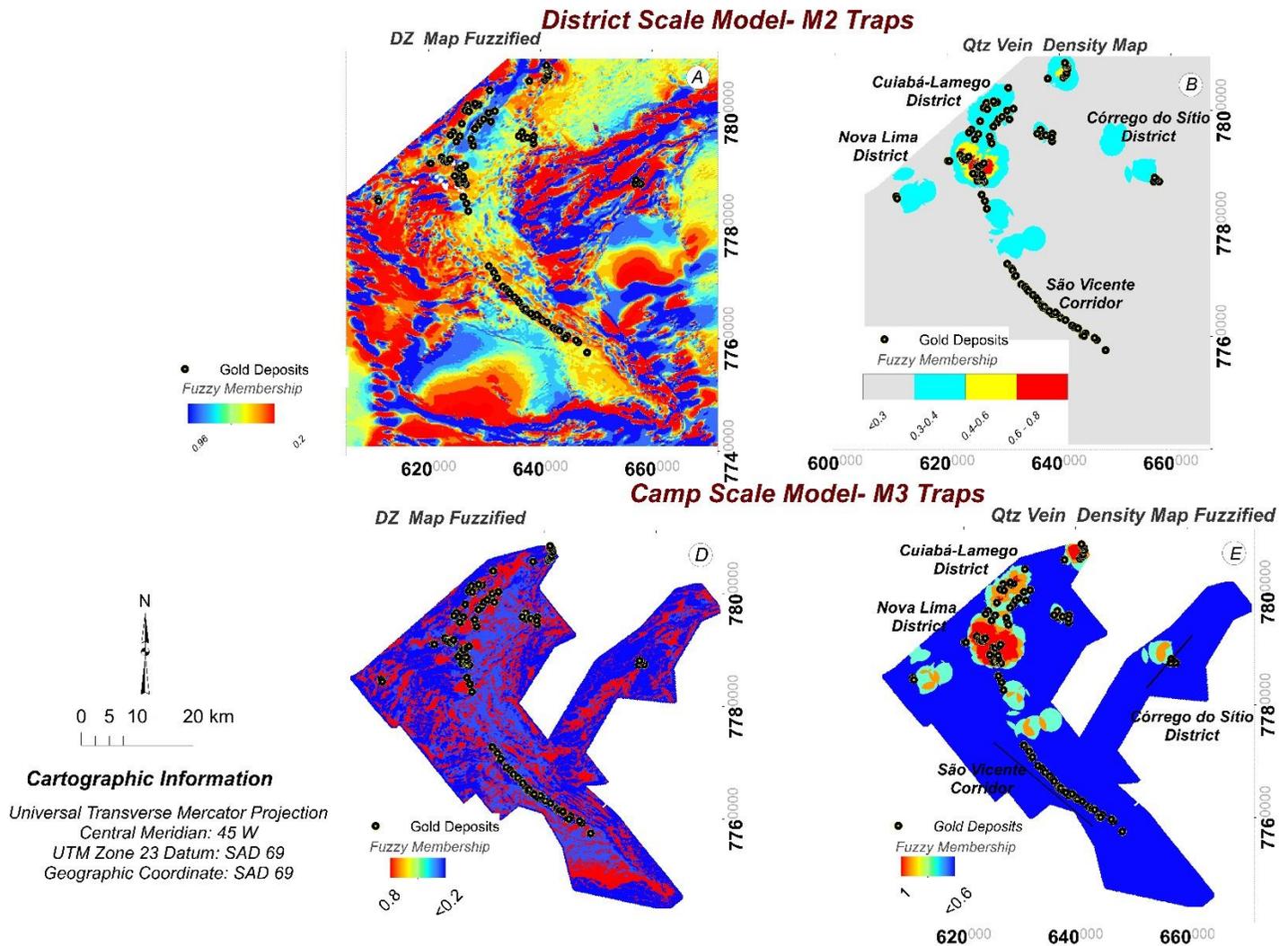


Fig. 12. (A) and (C) Fuzzified Map of DZ(Vertical Derivate of TMI – Total Magnetic Intensity) Map showing the correlation between the gold deposits and the Evidential Map. (B) and (D) Fuzzified Kernel or Quartz Vein Density Map and the Nova Lima, Cuiabá and Córrego do Sítio deposits correlation.

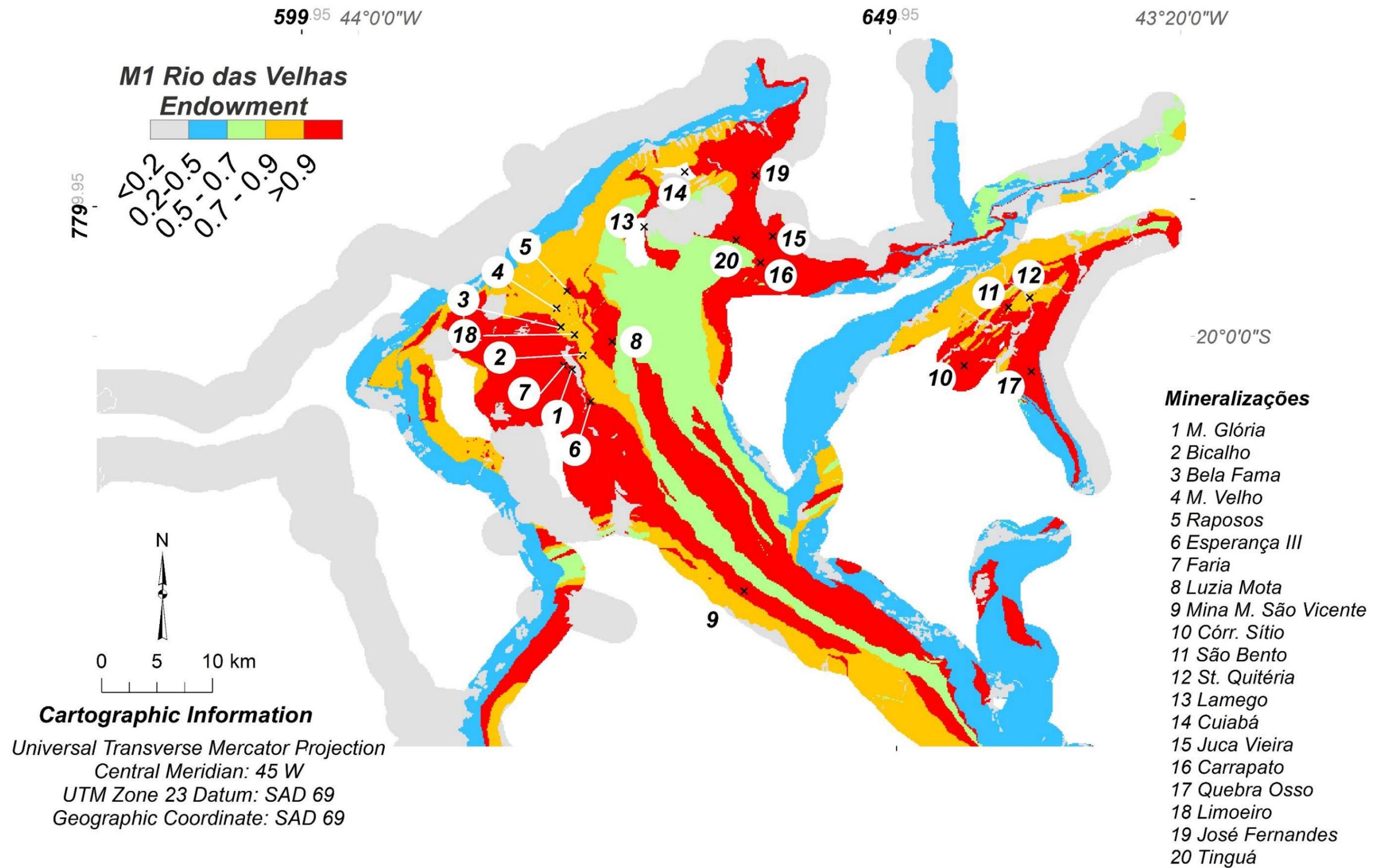


Fig. 13. RV Endowment Model (M1).

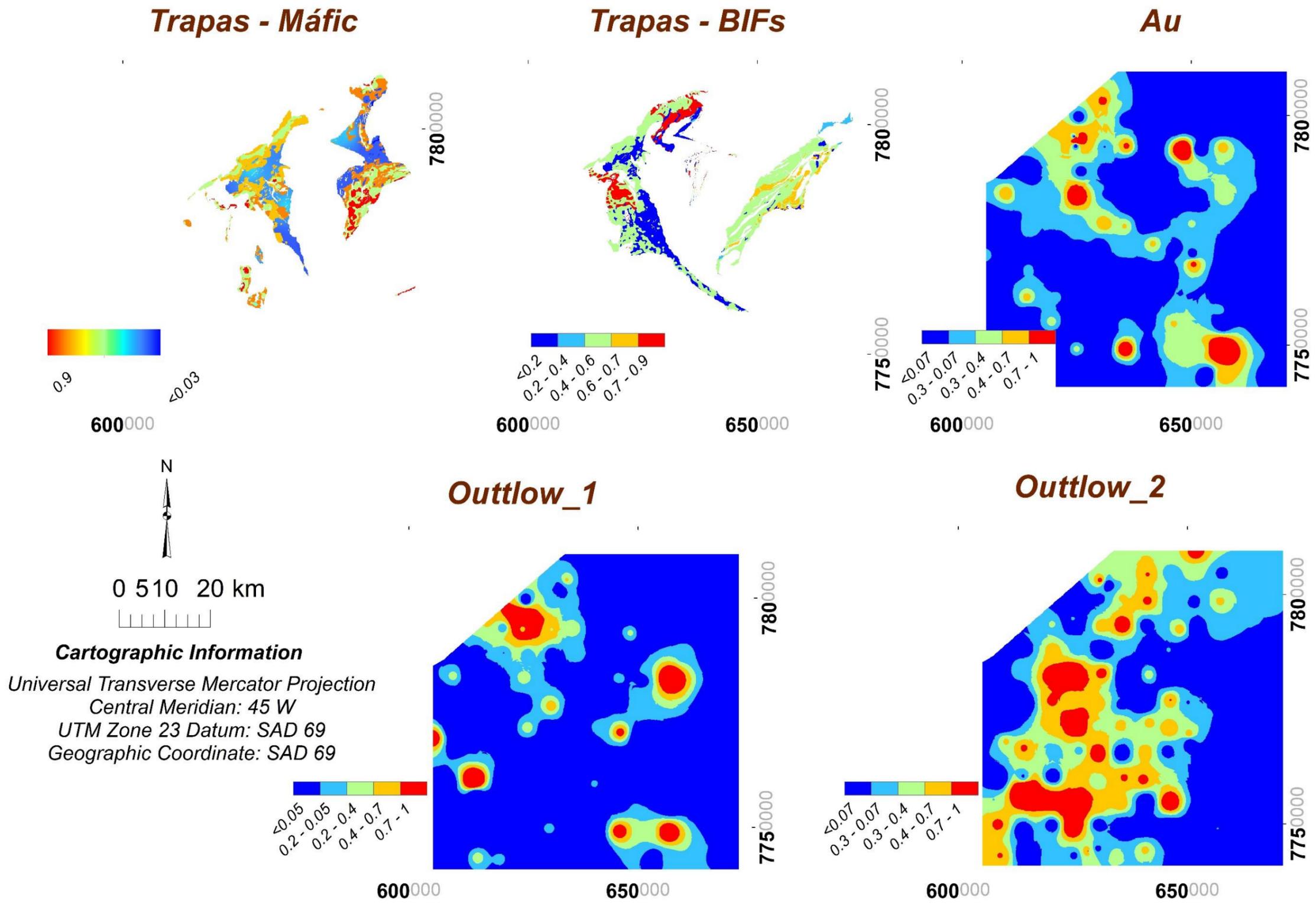


Fig. 14. Evidential Maps for M2 District Model. (A) Mafic Trap (B) Bif Trap (C) Au (D) Outflow_1 (E) Outflow_2.

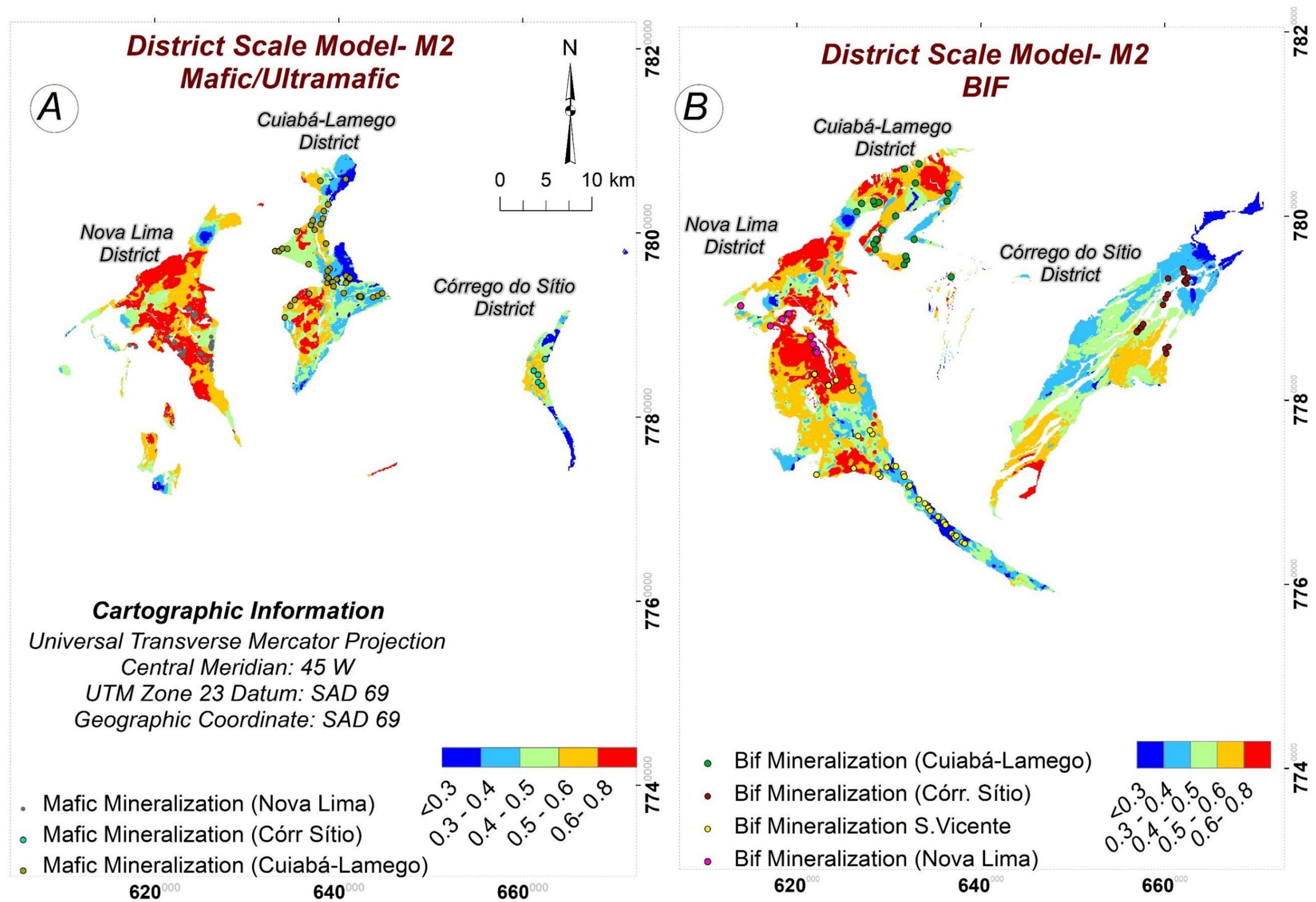


Fig. 15. The figure shows one model for a district scale for gold host scenarios in district scale: (A) Mafic/Ultramafic scenario. (B) BIF scenario.

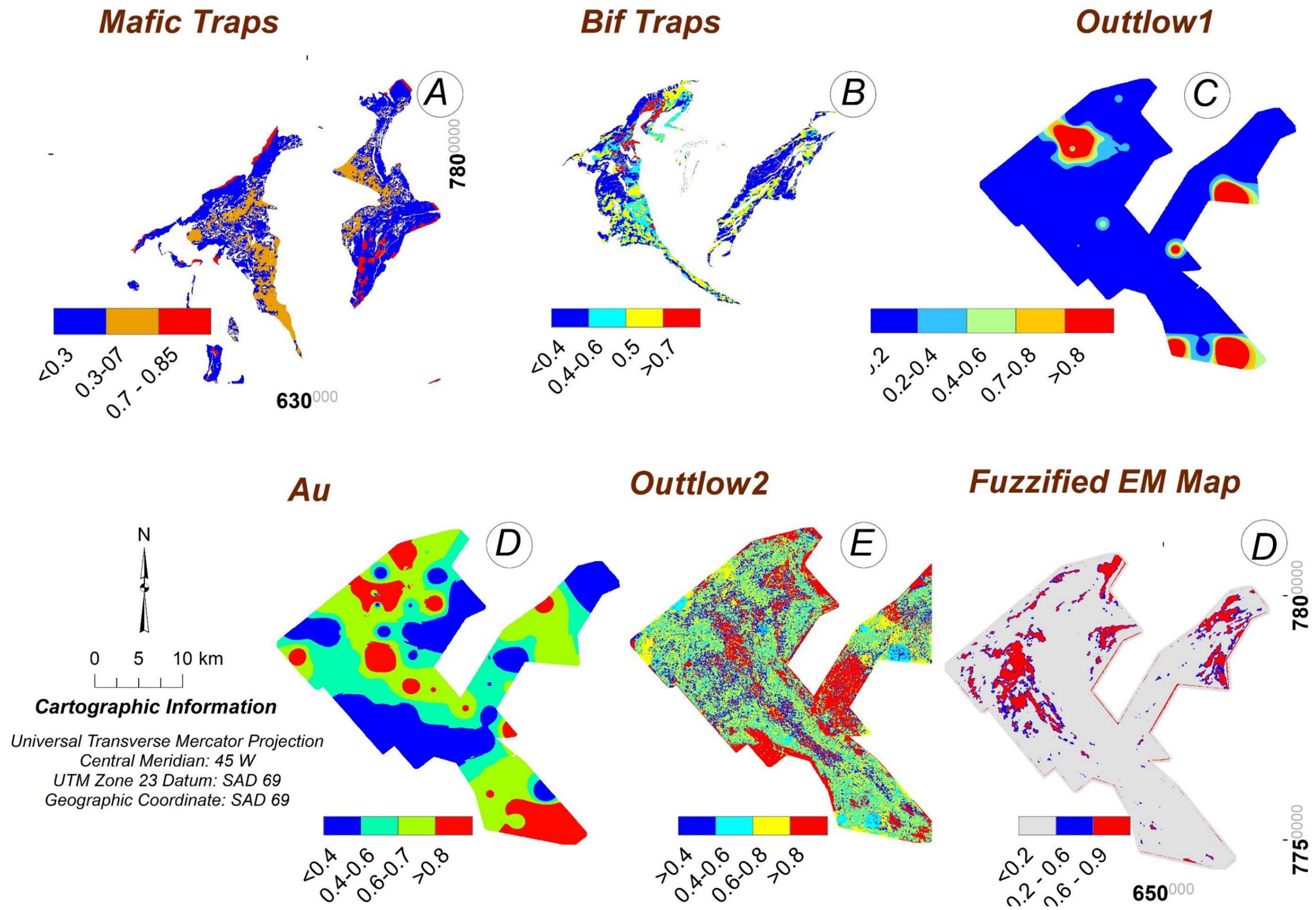


Fig. 16. Evidential Maps for M3 District Camp Scale Model. (A) Mafic Trap (B) Bif Trap (C) Outflow1 (D) Au (E) Outflow 2 (F) Electromagnetic Domains.

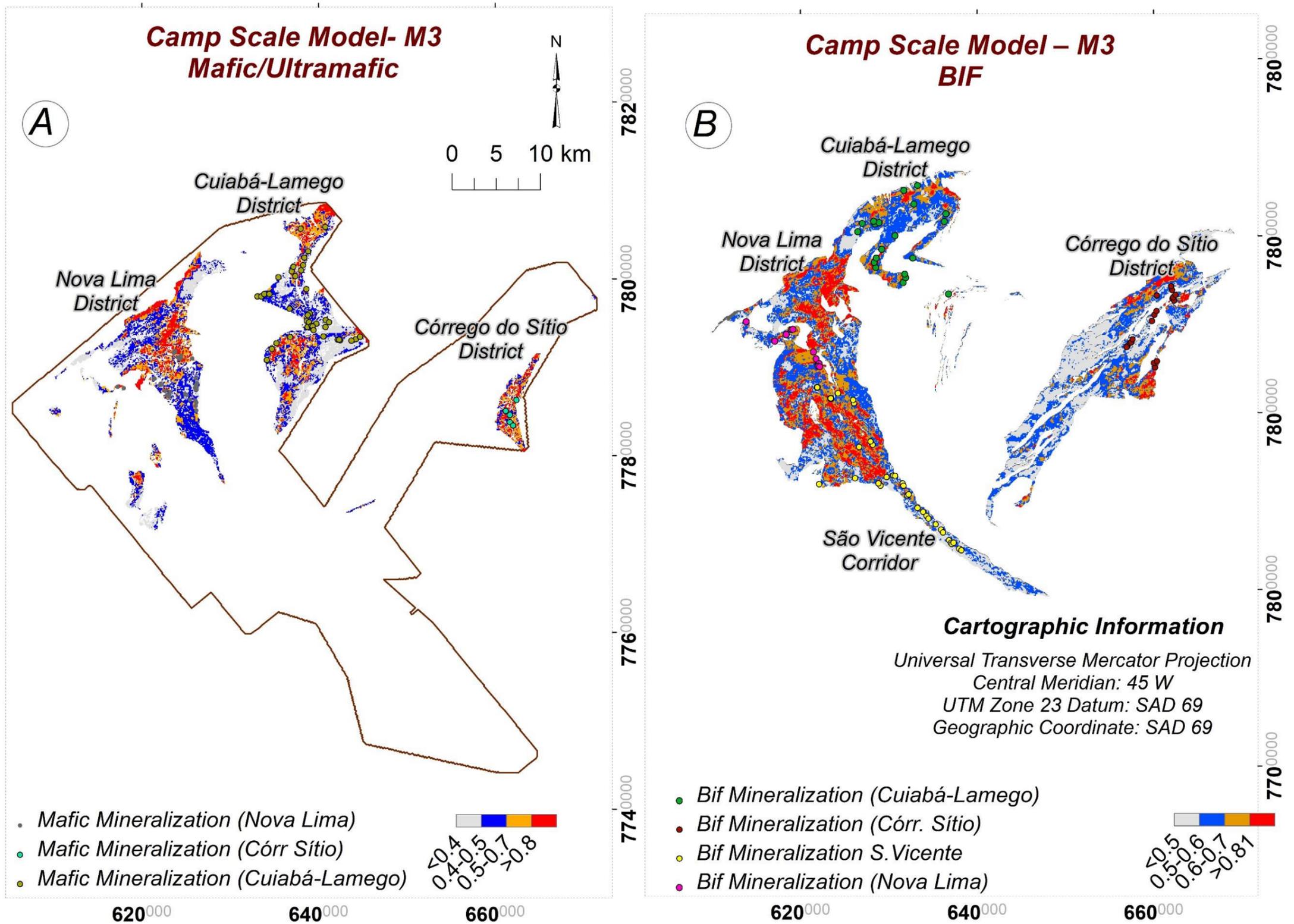


Fig. 17. The figure shows models for gold host scenarios in camp scale using high resolution data: (A) Mafic/Ultramafic scenario. (B) BIF scenario.

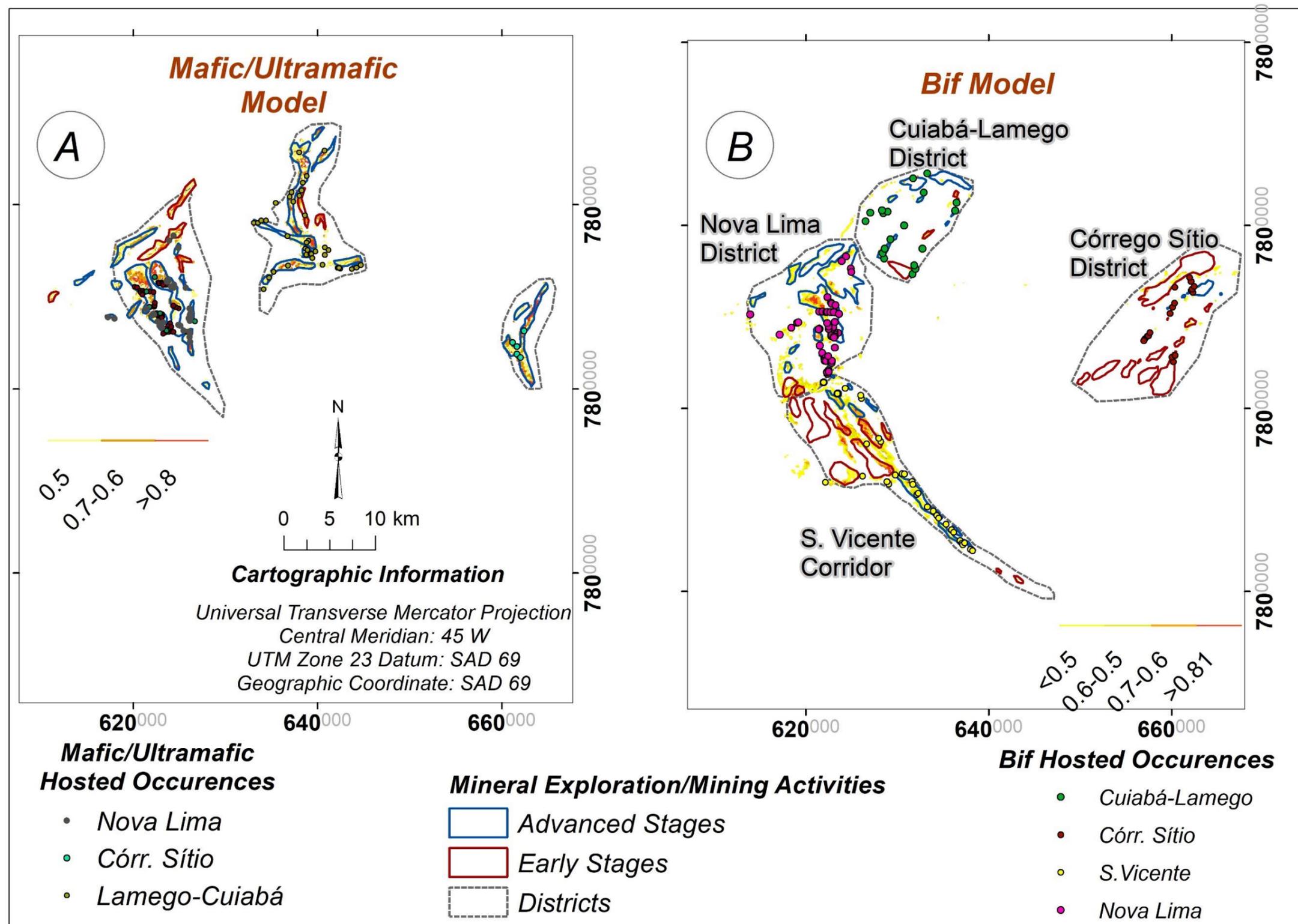


Fig. 18. Potential areas derived from Camp Scale Model (M3) – high resolution data.

Nesta tese desenvolveu-se um método para a priorização de prospectos minerais a partir da integração de técnicas de mapeamento do potencial mineral, com a abordagem de SM, e as ferramentas de Avaliação Econômica. Assim, conclui-se que a hipótese de que seja possível ordenar prospectos minerais utilizando-se essa metodologia seja verdadeira e a proposta central dessa tese foi alcançada.

Um modelo conceitual foi elaborado de forma a entender os três elementos para formação. De acordo com McCuig *et al.*, (2010), são eles: fertilidade, arquitetura favorável da litosfera e transição geodinâmica. Esses elementos desmembram-se em quatro diferentes componentes: fonte, *pathway* trapas e dispersão geoquímica. Fundamentado nos elementos e componentes de um sistema mineralizante definiu-se o Sistema Mineral Rio das Velhas para a pesquisa de depósitos auríferos orogênicos hospedados em ambiente do tipo *greenstone belt*:

Entende-se por fertilidade a atuação do evento tectono-termal que se deu nas fases finais de evolução do *Greenstone Belt* Rio das Velhas - GBRV (~2.77 Ga) (Lobato *et al.*, 2001). O fluido metamórfico gerado nesse evento concentrou ou reconcentrou metais que reagiram com várias unidades da estratigrafia do GBRV. Essa fertilidade em escala de província pode ser entendida como fonte ou região fonte rica em metais, no caso, ouro e outros metais secundários como prata. Alguns autores, como Silva (2006), sugere a sucessão vulcanossedimentar como fonte do ouro. Entretanto, outros autores indicam a possibilidade de contribuição de fluidos magmáticos na formação dos depósitos de ouro da região (Beleque, 2015). Em complemento, esses diferentes eventos magmáticos recentemente revisados por Lana *et al.*, (2013) e Farina *et al.*, (2015) como por exemplo, o Ciclo Rio das Velhas I (2.93-2.85 Ga) e II (2.80 -2.76 Ga), bem como o evento Mamonas (2.76–2.68 Ga), podem ter atuado na formação dos depósitos auríferos. Uma revisão do quadro de eventos do Rio das Velhas, posicionando-se idades dos diferentes pulsos mineralizantes é apresentada no artigo 01, no item “1.1 Regional Geological Context, Geodynamics and Associated Mineralization in the Rio das Velhas Greestone Belt”.

A arquitetura favorável da litosfera é interpretada pelos lineamentos de 1ª ordem, representadas por grandes falhas de empurrão que condicionam a arquitetura do Greenstone Belt Rio das Velhas como a Falha Bem-te-Vi, o Lineamento Paciência, entre outras estruturas de possível idade arqueana reativadas em eventos subsequentes (Paleoproterozóico e Brasileiro). Na escala de província, essas estruturas são chamadas de pathway e permitem a circulação de fluidos mineralizantes. Reforça-se a importância desses eventos posteriores na remobilização de fluidos e formação de novos pulsos mineralizantes.

A transição geodinâmica favorável é marcada por grandes eventos de evolução da crosta continental e atividades de plumas mantélicas, que correlacionam esses processos às idades frequentes para depósitos auríferos arqueanos (Groves *et al.*, 2005). O período entre 2.7 a 2.6 Ga compreende as ocorrências de depósitos gigantes e do tipo *world class*, os quais os autores o associam aos eventos de evolução da crosta continental.

As trapas físicas são representadas por estruturas de segunda ordem como charneiras de dobras e os veios concordantes ou discordantes à foliação regional. As trapas químicas foram interpretadas como as rochas reativas, cujo processo de alteração hidrotermal é mais acentuado. A dispersão geoquímica é atribuída ao vestígio deixado pela alteração hidrotermal.

Com base na interpretação do Sistema Mineral Rio das Velhas foram elaborados três modelos prospectivos em diferentes escalas para dois cenários distintos: depósitos hospedados rochas máficas/ultramáficas e depósitos hospedados em formações ferríferas bandadas.

O modelo na escala 1:500.000 definiu as partes mais férteis de um ambiente metalogênico (*endowment*), indicando a parte central do GBRV como a extensão inicial para aplicação do Programa Exploratório denominado SMRV (Sistema Mineral Rio das Velhas). A utilização do dado gravimétrico regional satelital ressaltou porções profundas do *endowment*, assim como importantes estruturas que apresentam claras relações espaciais com o conjunto de depósitos estudados (Distrito de Nova Lima, Cuiabá-Lamego, Córrego do Sítio e Lineamento Paciência).

O modelo M2, em escala de distrito, expressa os diferentes distritos minerais auríferos que hoje são compostos por projetos já implementados por empresas na região de Nova Lima e do Lineamento Córrego do Sítio.

O modelo na escala de blocos (M3) indica o conjunto de alvos exploratórios que devem ser ranqueados conforme os melhores valores de pertinência fuzzy.

O método de modelagem sugerido neste trabalho apresentou resultados congruentes, mapeando a expressão de depósitos em diferentes escalas. Com relação as formações ferríferas bandadas, sabe-se que apresentam diferentes propriedades físicas, que variam em valores de condutividade e magnetismo, o que dificulta a identificação de sua expressão na geofísica (Silva, 1999). Na integração de dados, os processos geológicos que provavelmente influenciam no *footprint* da mineralização das Minas de Cuiabá e Lamego hospedadas em Bif's, bem como depósitos análogos, foram ressaltados tanto nos modelos em escala de distrito como em bloco.

Os componentes interpretados para o Sistema Mineral Rio das Velhas, bem como vetores exploratórios da mineralização aurífera, fornecem a base para a simulação de um programa de exploração mineral. Esse exercício compreendeu três fases principais. A primeira delas corresponde ao reconhecimento regional na escala 1:500.000, onde possíveis áreas para investigação regional são indicadas. Em um segundo momento, na escala de 1:100.000, as anomalias regionais de geoquímica de solo, geofísicas (Magnetometria e Gamaespectrometria), bem como unidades selecionadas do Grupo Nova Lima (GBRV), definem de forma indireta a expressão areal da atuação de processos geológicos. Por fim, com a integração de dados de melhor resolução amostral, a expressão desses processos foi ressaltada em uma escala de bloco (1:50.000), cujas áreas resultantes foram ranqueadas conforme os maiores valores de favorabilidade mineral. Essas áreas foram novamente reclassificadas de acordo com a atividade mineral. Essa classificação fundamentou-se na integração de informações de títulos minerários e relatórios públicos das empresas atuantes no Quadrilátero Ferrífero. Como trata-se de uma região madura (*Brownfield*) com vários projetos minerais já implementados, as áreas foram classificadas como fase 3 do pipeline mineral (Figura 1.1), diferenciando-se em avançadas ou em estágios exploratórios iniciais.

Em seguida, uma análise quantitativa estimou para cada distrito, bem como para toda área do modelo M3 (escala 1:50.000), o número de depósitos não descoberto e recursos hipotéticos associados. Essa análise baseou-se na simulação de Monte Carlo que forneceu informações adicionais aos modelos de favorabilidade mineral.

Cabe ressaltar que, as estimativas não representam nem recurso ou reserva em censo estrito (Figura 1.2), porque uma análise econômica não foi executada. Para a identificação de valores reais de cada área potencial, é necessário a investigação por métodos diretos (sondagem, por exemplo) de forma que o corpo mineralizado seja de fato delineado e quantificado. Saliencia-se também que, a exata localização espacial dos depósitos não descobertos, bem como seus recursos associados não é conhecida, de forma que este trabalho apresenta uma estimativa da posição espacial baseando-se nas curvas de probabilidade dos depósitos já conhecidos.

Uma avaliação financeira (empírica) foi simulada para um projeto hipotético, onde levou-se em consideração: o pipeline de exploração mineral (Figura 1.1), o resultado do ranqueamento das áreas favoráveis para a prospecção de mineralizações auríferas, e o possível desempenho em termos de retorno financeiro. Três alternativas foram estudadas em termos de valor esperado (EMV – *Expected Monetary Value*) denominadas de 3A, 3B e 3C e representam a probabilidade de sucesso exploratório. Prospectos do tipo 3A estão localizados dentro de títulos minerários em fase de decreto de lavra ou portaria de lavra, e em uma área de influência (*buffer*) de até 1.6 km de depósitos conhecidos. Prospectos do tipo 3B, estão parcialmente inclusos em títulos minerários de mesma natureza que do tipo 3A, e podem ou não estar na área de influência dos depósitos conhecidos. Por último, o tipo 3C está inserido em direitos minerários em fase de pesquisa e sem qualquer associação com depósitos já provados. Considerando-se todas essas premissas, a probabilidade atribuída foi de 94%, 5% e 1% respectivamente para o tipo 3A, 3B e 3C.

Como resultado, observa-se que o Distrito de Nova Lima, bem como as áreas potenciais nele contido, obtiveram uma melhor competitividade quando comparado aos outros distritos. As curvas de teor e tonelagem apresentaram um valor médio de 1700 Mt de metal contido e um teor médio de 3.8 g/t (Figura 5.1). Em uma análise integrada do EMV e da

favorabilidade mineral, observa-se a distribuição as áreas que poderiam ser candidatas a futuras investigações geológicas (Figura 5.2).

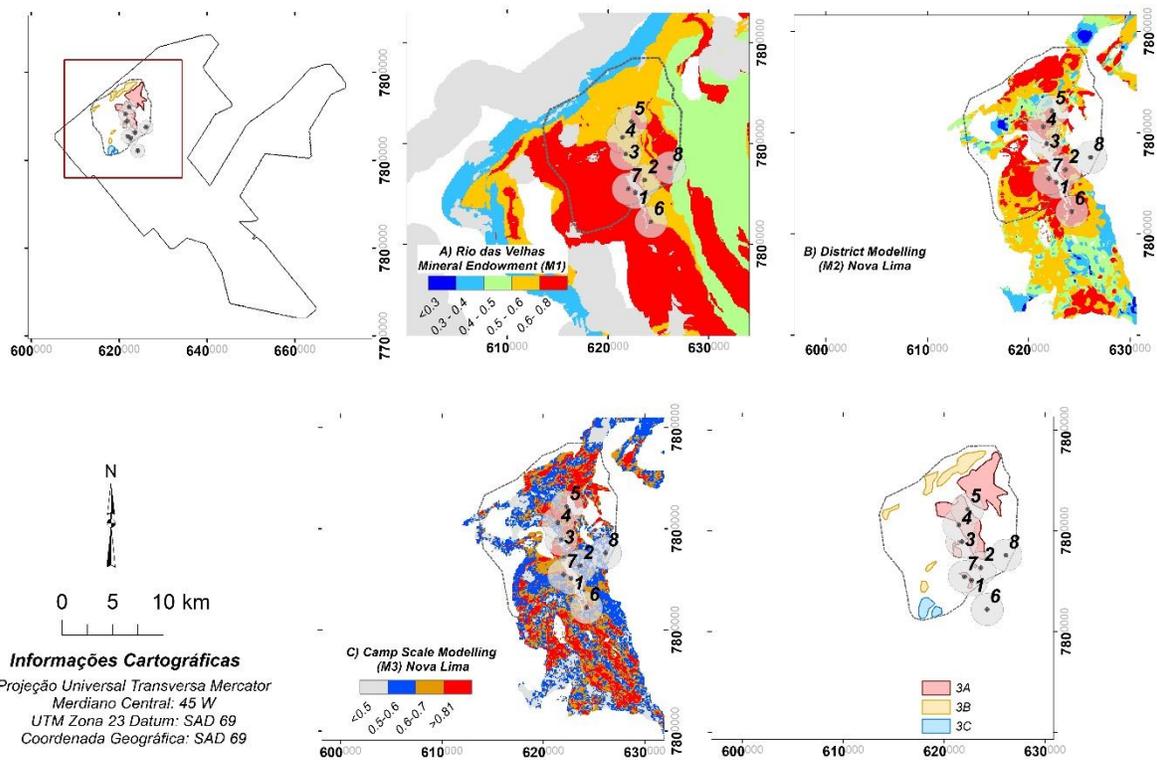


Figura 5.1 Integração em multiescala e multi-estágios em A, B e em C. Esses mapas fornecem a expressão de processos geológicos mineralizantes em três escalas: província, distrito e blocos. A fase final é o ranqueamento de áreas potenciais mapeadas para prospecção de mineralizações auríferas hospedadas em Bif's no distrito de Nova Lima.

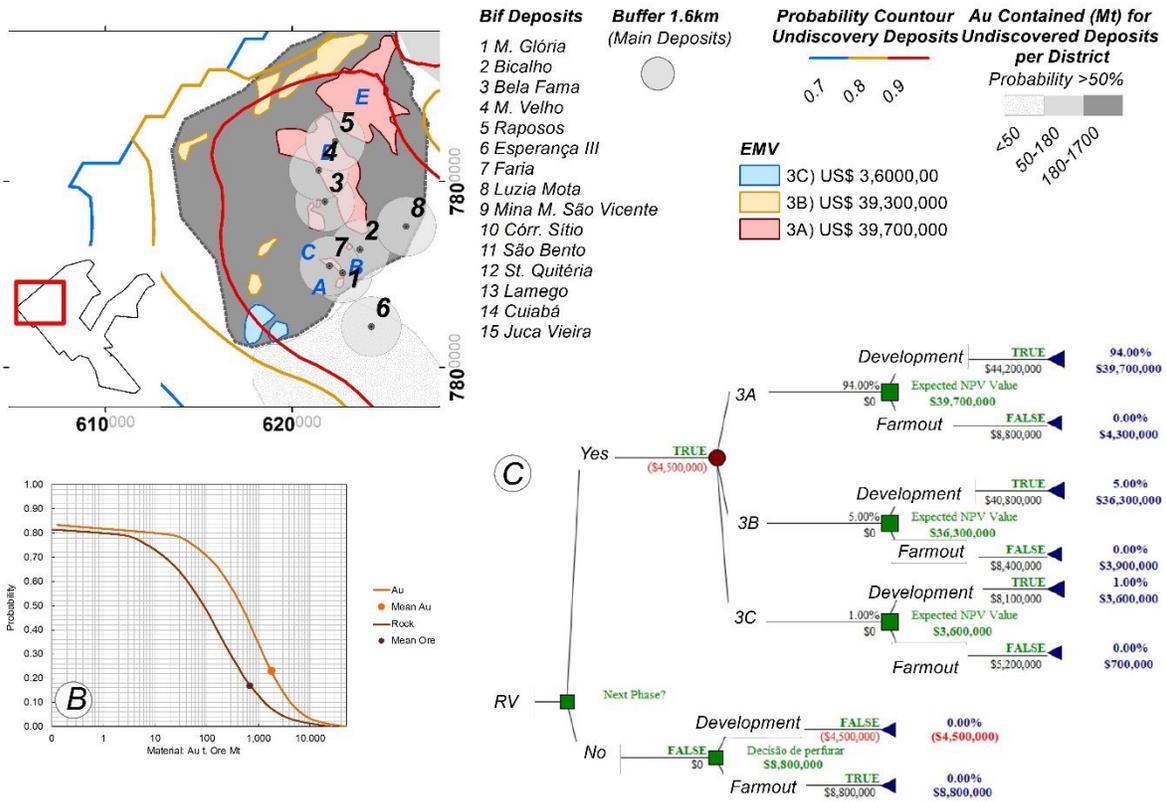


Figura 5.2 - Integração final do ranqueamento de áreas potenciais. Apresenta também os contornos de probabilidade para depósitos não descobertos e as curvas de teor e tonagem em B. Em C, apresenta a árvore de decisão calculada para um prospecto hipotético e suas alternativas 3^a, 3B e 3C.

Referências Bibliográficas

- Agterberg, F.P. Bonham-Carter, G.F. 1989. Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the prediction of discrete events: Proceedings 22nd APCOM Symposium, Berlin, Germany, v.2, p. 381-395.
- Alkmim, F. F.; Marshak, S.; Evangelista, H. J.; Brueckner, H. 1994. Manifestações do evento transamazônico no Quadrilátero Ferrífero. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., Camboriú., 1994. Anais. Camboriú, SBG. v. 1, p. 75-76.
- Alkmim, F. F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C. Dal Ré Carneiro e B. Brito Neves (orgs.). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida. p17-35.
- Allen, P. A. & Allen, J. R. 2005. Basin Analysis: Principles and Applications, second edition, Blackwell Publishing, 549p.
- AngloGold Ashanti. 2010. Exploration Pipeline. Acessado em 10 Jan 2016. <http://www.anglogoldashanti.com/en/Media/Presentations/Results%20for%20the%20third%20quarter%20ended%2030%20September%202010-2010.pdf>
- Australian Academy of Science. 2012. Searching the Depp Earth. <http://www.science.org.au/policy/uncover.html>.
- Babinski M, Chemale Jr F, Van Schumus WR. 1995. The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Precambrian Research v.72 p235-245.
- Barnicoat, A.C., 2007. Mineral systems and exploration science: linking fundamental controls on ore deposition with the exploration process. In: Andrew, C.J., et al. (Eds.), Digging Deeper: Proceedings of the Ninth Biannual SGA Meeting, Dublin, Ireland 20th-23rd August 2007, p1407-1410
- Baltazar, O.F., Zucchetti, M.; 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits Ore Geology Reviews, p63-103.
- Bateman, A.M.1951. The formation of mineral deposits. John Wiley and Sons, New York; Chapman and Hall, London, p1-3171.
- Beleque, A.R.C. 2015. Estudo geocronológico e evolução metalogenéticas da mineralização aurífera do depósito Engenho D'Água Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) / Andreia Raquel Coelho Beleque. – São Paulo, 152 p.
- Berger, B.R., 1986. Descriptive model of carbonate-hosted Au-Ag, in Cox, D.P., and singer, D.A., eds., Mineral deposit models: U.S. Geological Survey Bulletin 1693, p. 175.
- Bonham-Carter, G.F. 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS: Pergamon, Oxford, 398 p.
- Bohlke, J.K., 1982. Orogenic metamorphic-hosted gold-quartz veins. U. S. Geol. Survey. Open-File Rep. 795, 70-76p.
- Brasil, H., G. 2002. Avaliação Moderna de Investimentos. Rio de Janeiro. Qualitymark. 220p.
- Brealey, Richard A; Myers, Stewart C; Marcus, Alan J. 2002. Fundamentos da Administração Financeira. 3ed. – Rio de Janeiro: McGraw-Hill Irwin.
- Carneiro M.A. 1992. O complexo metamórfico Bonfim setentrional: evolução geológica de um segmento arqueano de crosta continental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 232 p.

- Carneiro MA, Teixeira W, Carvalho Jr IM, Fernandes R.A. 1998. Ensilic tectonic setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt: Nd and Pb isotopic evidence from the Bonfim metamorphic complex, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* v28, p29-44.
- Carranza, E.J.M. 2009. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, 11. 351p.
- Colvine, A.C., Andrews, A.J., Cherry, M.E., Durocher, M.E., Fyon, J.A., Lavigne, M.J., MacDonald, A.J., Marmont, S. 1984. An integrated model for the origin of Archean lode gold deposits. *Ont. Geol. Surv. Open-File Rep.* 5524, p98.
- Cox, S.F. 1999. *Deformational Controls on the Dynamics of Fluids Flow in Mesothermal Gold Systems*. Geological Society. London, Special Publications, 5, p123-140.
- Dorr, J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. USGS, 110. Professional Paper, 641-A.
- Doggett, M.D.; Mackenzie, B. W. 2010. *Economic Evaluation of Exploration Projects Course Adimb*.
- Dubé, B, Williamson, K, Mcnicoll, V, Malo, M, Skulski, T, Twomey, T, Sanborn-Barrie, M. 2004. Timing of Gold Mineralization at Red Lake, Northwestern Ontario, Canada: New Constraints from U-Pb Geochronology at the Goldcorp High-Grade Zone, Red Lake Mine, and the Madsen Mine. *Econ. Geol.* V 99, p1611-1641.
- Dubé, B. & Gosselin, P. 2007. Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits in Goodfellow, W.D. (ed). *Mineral Deposits of Canada. A Syntesis of Major Deposits Ypes, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*, St. John's, NL.: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, p49-73.
- Duff, B.A., & Hall, D.M., 1996. A model-based approach to evaluation of exploration opportunities, in Dore, A.G., and Sinding-Larsen, R., eds., *Quantification and Prediction of Hydrocarbon Resources: Stavanger*, Elsevier, Norwegian Petroleum Society Special Publications, p183-196.
- Eggert, R. G. 1987. *Metallic Mineral Exploration: An Economic Analysis*. RFF Press. 104p.
- Farina, F., Albert, C., Lana, C., 2015, The Neoproterozoic transition between medium- and high-K granitoids: Clues from the Southern São Francisco Craton -Brazil, *Precambrian Research*, v.266, p.375-394.
- Foster R.P. 1990. *Gold Metallogeny and Exploration*.
- Goldfarb, R.J., Christie, A.B., and F.P. Bierlein. 2005. The orogenic gold deposit model and New Zealand: consistencies and anomalies, *Proceedings of the New Zealand Minerals and Mining Conference*, Publicity Unit, Crown Minerals, Ministry of Commerce, p105-114.
- Goldfarb, R.J.; Groves, D.I. 2015. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time *Lithos*.
- Grayson, C.J.J. 1960. *Decisions Under Uncertainty, Drilling Decisions by oil and Gas Operators*. Division of Research, Graduate School of Business Administration. Havard University. 1-402p
- Groves, D.I., Phillips, G.N., Ho, S.E., Henderson, M.E., Clark, M.E., and Woad, G.M. 1984. Controls on distribution of Archean hydrothermal gold deposits in Western Australia, in Foster, R.P., ed., *Gold '82: The Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits: Proceedings of the International Symposium: Balkema, Rotterdam*, p689-712.
- Groves, D.I; Foster, R.P. 1991. Archean Lode Gold Deposits, in Foster R.D (ed). *Gold Metallogeny and Explroation*, Cgapman and Hall. New York. 63-103p.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, H., Hagemann, S.G., Robert, F. 1998. Orogenic gold deposits—a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit type. *Ore Geol. Rev.* 13, p7–27.

- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Knox-Robinson, C.M., Ojala, J., Gardoll, S., Yun, G., Holyland, P. 2000. Late-kinematic timing of orogenic gold deposits and significance for computer-based exploration techniques with emphasis on the Yilgarn block, Western Australia. *Ore Geol. Rev.* 17, p1–38.
- Groves, D.I.; Condie, K.C., R.J. Goldfarb, J.M.A. Hronsky, R.M. Vielreicher. 2005. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits *Economic Geology*, 100, p203–224
- Groves, D.I. & Santosh, M. 2015. Province-scale commonalities of some worldclass gold deposits: Implications for mineral exploration. *Geoscience Frontiers*. p1-11.
- Hagemann, S.G., Cassidy, K.F. 2000. Archean orogenic lode-gold deposits. In: Hagemann, S.G., Brown, P.E. (Eds.), *Gold in 2000: Reviews in Economic Geology*, 13, p9–68.
- Hagemann, S.G.; Lisitsin, V.A. Huston, D.L. 2016. Mineral System Quo Vadis. *Ore Geol. Rev.* 76, 504–522.
- Harbaugh, J. W.; Bonham-Carter, G. 1970. *Computer simulation in geology*. New York ; Sydney : Wiley-Interscience, 575p.
- Harris, D.P. 1990. *Mineral Exploration Decisions: A Guide to Economic Analysis and Modeling*. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons, New York. p1-436.
- Hronsky, J.M.A., Groves, D.I. 2008. Science of targeting. Definition, strategies, targeting and performance measurement. *Australian Journal of Earth Sciences* v55, p3-12.
- Hodkiewicz P. F., Weinberg R. F., Gardoll S. J. & Groves D. I. 2005. Complexity gradients in the Yilgarn Craton: fundamental controls on crustal-scale fluid flow and the formation of worldclass orogenic-gold deposits. *Australian Journal of Earth Sciences* 52, p831– 842.
- Knox-Robinson, C.M., Wyborn, L.A.I. 1997. Towards a holistic exploration strategy: using geographic information systems as tool to enhance exploration. *Australian Journal of Earth Sciences* v.44, p453-463.
- Kreuzer, Oliver P.; Etheridge, Michael A.; Guj, Pietro; McMahon, Maureen E.; Holden, Darren J. 2008. Linking mineral deposit models to quantitative risk analysis and decision-making in exploration. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*.
- Lana, C., Alkmim, F.F., Armonstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini Jr., H.R. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, Southeast Brazil. *Precambrian Res.* v231, p157–173.
- Larizatti, J. H. 2005. Mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno. *Informes de Recursos Minerais. Série Metais - Informes Gerais*, v.02, 210p.
- Lisitsin, V. 2015. Mineral prospectivity analysis and quantitative resource assessments for regional exploration targeting: development of effective integration models and practical applications. Ph.D. Thesis. University of Western Australia. School of Earth and Environment. Centre for Exploration Targeting. 666 p.
- Lobato, L.M; Vieira, F.W.R., Ribeiro-Rodrigues, L.C; Pereira, L.M.M.; Menezes, M. G.; Junqueira, P.A; Pereira, S.L.M. 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima group of the Quadrilátero Ferrífero: Part I, descriptions of selected gold deposit. *Rev. Bras. Geoc.* v. 28, p339-354.
- Lobato L.M, Ribeiro-Rodrigues L.C, Costa M.N.S, Martins M, Lehne E, Alves J.V, Tassinari C.C.G, Vieira F.W.R, Biasi E.E, Silva R.C.F, Pereira C.A, Noce C.M. 2001. Depósito de Ouro Cuiabá, Quadrilátero Marta Edith Velásquez David. Dissertação de Mestrado, IGc-USP 73 Ferrífero, Minas Gerais. In: Jost H, Brod J.A, Queiroz E.T (Coordenação Editorial). *Caracterização de depósitos auríferos em distritos mineiros brasileiros*. Brasília, DNPM/ ADIMB, p 3-77.
- Lobato, L. M. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero: integração e correção cartográfica em SIG.
- Lobato LM, Santos; J.O.S, McNaughton, N.J.; Fletcher, I.R.; Noce, C.M. 2007. U-Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits, Rio das Velhas greenstone belt, quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews* v.32, p764-680.

- Lockzy, L., Ladeira, E.A. 1976. Geologia estrutural e introdução à Geotectônica. Edgard Blucher. Rio de Janeiro. p.528.
- Lord, D., Etheridge, M.A., Willson, M., Hall, G., and Uttley, P.J. 2001. Measuring exploration success: An alternative to the discovery-cost-per-ounce method of quantifying exploration success: Society of Economic Geologists Newsletter v.45, p1,10–16.
- Lowe, D.R., 1994. Archean greenstone-related sedimentary rocks. In:Condie, K.C. (Ed.), Archean Crustal Evolution. Elsevier, Amsterdam, p121–169.
- Porwal, A.K; Kreuzer, O.P. 2010. Introduction to the Special Issue: Mineral prospectivity analysis and quantitative resource estimation. Ore Geology Reviews, v.38, p121-127.
- Porwal, A., Carranza, E.J.M., 2015. Introduction to the special issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration. Ore Geol. Rev. v.70, p.477–483.
- Nykänen, V.; Ojala, V. J. 2007. Spatial Analysis Techniques as Successful Mineral-Potential Mapping Tools for Orogenic Gold Deposits in the Northern Fennoscandian Shield, Finland. Natural Resources Research, v. 16.
- Noce, C.M. 1995. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. São Paulo, 128p. (Tese-Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Noce, C.M., Machado, N., Teixeira, W., 1998, U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero- Southern São Francisco Craton: age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism, Revista Brasileira de Geociências, v. 28, p. 95-102.
- Noce, C.M., 2000, Geochronology of the Quadrilátero Ferrífero: a review. Geonomos v7, p. 15–23.
- Machado, N., Carneiro, M.A. 1992. U-Pb Evidence of late Archean Tectono-Thermal Activity in the Southern São Francisco Shield, Brazil. Canadian Journal of Earth Sciences, v. 29 p2341-2346.
- Machado N., Noce C.M., Ladeira E.A., Belo de Oliveira O.A. 1992. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. Geol. Soc. Am. Bul., 104:1221-1227p
- Magoon, L.B., Dow, W.G. 1994. The petroleum system. AAPG Memoir v.60, p3-24.
- Marshak, S.; Tinkham, D.; Alkmim, F. F.; Brueckner, H.; Bornshorst, T. 1997. Dome-and-keel provinces formed during Paleoproterozoic orogenic collapse - core complex, diapirs, or neither? examples from the Quadrilátero Ferrífero and the penocean orogen. Geology, v. 25, n. 5, p145-418.
- Marshak, S.; Alkmim, F. F. 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. Tectonics, v., 8, n. 3, p. 555-571.
- McCuaig, T.C., Kerrich, R., 1998. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics: Ore Geology Reviews, v. 12, p.381-453.
- McCuaig, T.C., Beresford, S., Hronsky, J. 2010. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system: Ore Geology Reviews, v. 38, pag 128–138.
- McCuaig, T.C., Hronsky, J. 2014. The Mineral System Concept: The Key to Exploration Targeting Society of Economic Geologists, Special Publication 18. Pag 153-175.
- Mian, M. A. 2002. Project Economics and Decision Analysis: Probabilistic models, PennWell Books, 411p
- Moon, C. J., Whateley, M. K.G., Evans A. M. 2006. Introduction to Mineral Exploration. 2nd ed. Blackwell Publishing. 499p.
- Nykänen, V.; Juhani Ojala, V. 2007. Spatial Analysis Techniques as Successful Mineral-Potential Mapping Tools for Orogenic Gold Deposits in the Northern Fennoscandian Shield, Finland. Natural Resources Research, Springer Netherlands, vol. 16(2), p85-92. DOI: 10.1007/s11053-007-9046-5.

- Noce, C. M. 2000. Geochronology of the Quadrilátero Ferrífero: A review. *Geonomos Belo Horizonte*, v. 8, n.11, p15-23.
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, Berlin. 1250 p.
- Phillips G.N., Powell R. 2009. Formation of gold deposits: Review and evaluation of the continuum model: *Earth-Science Reviews*, v. 94, p.
- Porwal, A. 2006. *Mineral Potential Mapping with Mathematical Geological. Models*. Ph.D. Thesis, University of Utrecht, The Netherlands, ITC (International Institute for Geo-nformation Science an Earth Observation) Publication N.130, Enschede, 289p.
- Porwal, A., & Kreuzer, O. P. 2010. Introduction to the Special Issue: Mineral prospectivity analysis and quantitative resource estimation. *Ore Geology Reviews*, 38(3), p121–127.
- Porwal, A.; Carranza, E.J.M. 2015, 'Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration', *Ore Geology Reviews*, 71, pp. 477-483
- Ribeiro-Rodrigues L.C. 1998. Gold Mineralization In: *Archaean Banded Iron Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil – The Cuiabá Mine*. Rwth Aachen, Germany, Aachener Geowissenschaftliche. Tese de Doutorado, 262p
- Renger, F. E., Noce, C. M., Romano, A. W. & Machado, N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, v2 (1): p1-11
- Schorscher, H.D. 1976. Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na região de Itabira, Minas Gerais. (res). In: *Congresso Brasileiro de Geologia. Ouro Preto, Anais Ouro Preto: SBG, 1976. P.194-195.*
- Schorscher, H. D. 1978. Komatiitos na estrutura “Greenstone Belt”, série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Minas Gerais, Brasil. In: *Congresso Brasileiro de Geologia. Recife. Resumo das Comunicações... Recife: SBG, Boletim n.1, p.292-293*
- Silva, A.M. 1999. *Geophysical and Geological Data Integration Using a New Statistical Approach for Mineral Target Selection Applied to the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero*. Inst. De Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado.
- Silva, A. M.; Mccafferty, A. E. ; Pires, A. C. B.2003. A new statistical approach to map BIF-hosted gold deposits in Rio Das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil.. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33.
- Silva, C.M.G. 2006. *Aplicação de isótopos radiogênicos da mineralização da Mina Cuiabá, Greenstone Belt Rio das Velhas (M.G.)*. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Tese de doutorado, 138 p.
- Singer, D.A.; Kouda, Ryoichi. 1999. Examining risk in mineral exploration: *Natural Resources Research*, v. 8, n. 2, p111–122.
- Stanlay, M. C. 1994. *A quantitative estimation of the value of geoscience information in mineral exploration: Optimal search sequences*. The University of Arisona. Doctor of Philosophy. 402pag.
- Stermole, F.; Stermole, J. 1996. *Economic evaluation and investment decision methods*. Golden, Colo. : Investment Evaluations Corp. 716p
- Teixeira, W., Carneiro M.A., Noce C.M., Machado N., Sato, K., Taylor, P.N. 1996. Pb, Sr and Nd isotope constrains on the Archean evolution of gneissic granitoid complexes in the southern São Francisco Craton, Brazil, *Precambrian Research*, v78, p.151-164.
- Teixeira A.A. 2003. *Integração de Dados Multifontes para Exploração Mineral de Ouro, Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de mestrado, 180p.
- Tulcanaza, E. 2015. *Avaliação de Empreendimentos e Recursos Minerais*. Oficina de Textos. 304 p.
- Vallée, M., Bouchard, G. 2001. *Guide to the Evaluation of Gold Deposits*, CIM Special Volume 45, p. 4

- Valeriano, M. M. 2008. Dados Topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (org). Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 3, p.72-103.
- Yun, G.Y., Groves, D.I., Knox-Robinson, C.M., Gardoll, S.J. 1998. GIS-based methodology for prospectivity analysis of orogenic lode gold deposits: a preliminary study of the Kalgoorlie terrane as an example. In: Zhou, Q., Li, Z., Lin, H., Shi, W. Ž. Eds. , Proceedings of Geoinformatics '98 Conference: Spatial Information Technology Towards 2000 and Beyond., Beijing, p288–298.
- Wylborn LAI, Heinrich CA, Jaques AL. 1994. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. In: Hallenstein PC (ed) Australian mining looks north – the challenges and choices. Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 5, p109-115.