



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESERVAÇÃO SUPERFICIAL DE
ÁGUA NO DISTRITO FEDERAL COM APLICAÇÃO DE
GEOTECNOLOGIAS**

Cristiane Oliveira de Moura

MONOGRAFIA

BRASÍLIA

2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

Cristiane Oliveira de Moura

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESERVAÇÃO SUPERFICIAL DE
ÁGUA NO DISTRITO FEDERAL COM APLICAÇÃO DE
GEOTECNOLOGIAS**

**Monografia de especialização em
Geoprocessamento Ambiental apresentada
a banca examinadora do Instituto de
Geociências como exigência para a
obtenção do título de especialista em
Geoprocessamento**

Aprovada em 16/03/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig (orientador)

Prof^ª. Dr^ª. Julia Barbosa Curto

Prof. Dr. Edilson de Souza Bias

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

OM929a Oliveira de Moura, Cristiane
Análise do Potencial de Reservação Superficial de Água no
Distrito Federal com Aplicação de Geotecnologias / Cristiane
Oliveira de Moura; orientador Henrique Llacer Roig. --
Brasília, 2018.
17 p.

Monografia (Especialização - Geoprocessamento Ambiental)
- Universidade de Brasília, 2018.

1. Geotecnologias. 2. Sistema de Informação Geográfica.
3. Recurso Hídrico. I. Llacer Roig, Henrique, orient. II.
Título.



AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Henrique Llacer Roig pelos ensinamentos e incentivo.

Aos docentes e discentes do Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental do Instituto de Geociências - UnB.

Agradecemos aos geólogos Prof. Dr. Elói Campos e Dr. Flávio Henrique Freitas e Silva pelas contribuições para o desenvolvimento do estudo.

Gostaria ainda de expressar gratidão aos meus pais e minha filha Manuela pelo amor e carinho sempre.

Agradeço, Agradeço e Agradeço!

“Mas nós não chegamos aonde precisamos chegar.

Todos nós temos mais trabalho a fazer”

Barack Obama

RESUMO

Esse trabalho apresenta uma proposta metodológica para a caracterização do potencial de reserva superficial de água com uso das ferramentas e técnicas em geoprocessamento. Tendo em vista os avanços e técnicas encontrados nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e a possibilidade de utilizá-los como sistema de apoio a tomada de decisão. Utilizando critérios especializados, para geração de mapas para o potencial à reserva no Distrito Federal, que podem servir como indicadores em ações de planejamento e gestão, assim como a identificação de zonas consideradas de baixo potencial para a localização de novas unidades de reserva. A metodologia apresentada para a quantificação do índice de favorecimento a identificação de potenciais locais de barramento e reservatório para Distrito Federal é uma combinação de variáveis espaciais relacionadas a parâmetros geológicos, geomorfológicos e hidrológicos. A geologia, derivada do mapa 1:100.000 foi o tema empregado como referência principal para a conexão dos dados vetoriais com os dados alfanuméricos referente a variável Interconectividade de Fraturas, servindo ainda para representação dos parâmetros para Grau de Coerência e Geossistemas, que em conjunto com as informações básicas sobre Hidrogeologia (sistemas fraturado e cárstico) e Porosidade Efetiva (sistema freático), compõem o Índice de Potencial Geológico ao Barramento e Reservatório. Quanto ao Índice Geomorfológico foram consideradas as unidades de compartimentação elaboradas a partir da organização das características descritivas do relevo em função da altimetria e declividade obtidas por levantamento aerofotogramétrico na escala 1:10.000. O Índice Hidrológico está representado pela estimativa das vazões específicas com base em dados coletados em diversas estações hidrológicas, operadas pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - CAESB e obtidas a partir das vazões médias mínimas. Os valores de referência adotados neste trabalho representam estatísticas obtidas a partir das séries hidrológicas estimadas para cada uma das unidades hidrológicas e entraram como atributos do arquivo shapefile. Os critérios e pesos adotados nesta pesquisa foram apresentados como propostas iniciais orientadas por outros estudos para o território brasileiro e detalhamento a partir do conhecimento de especialistas. Aspectos no tratamento dos dados de vazão, além de melhoramentos metodológicos para aplicação dos dados de topografia deverão ser considerados para o avanço da pesquisa.

Palavras-chave: Geotecnologias; Sistema de Abastecimento de Água, Reserva, Barragem, Água.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS	2
2.1 Material	2
2.2 Análise Multicritério Aplicada ao SIG	3
2.3 Processamento dos Dados	3
2.4 Definição das Variáveis	4
2.4.1 <i>ÍNDICE GEOLÓGICO</i>	4
2.4.2 <i>ÍNDICE GEOMORFOLÓGICO</i>	7
2.4.3 <i>ÍNDICE HIDROLÓGICO</i>	7
2.5 Álgebra de Geo-Campos	7
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
4. CONCLUSÕES	8
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	9

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Pontuação variáveis geológicas -Barragem.	4
Quadro 2 – Pontuação variáveis geológicas -Reservatório.	4
Quadro 3 – Pontuação para as classes da variável Geossistema	5
Tabela 1 – Valores de porosidade efetiva para os sistemas aquíferos do domínio freático. Fonte: Campos & Freitas-Silva (1998).	5
Quadro 5 – Pontuação para as classes da variável Porosidade Efetiva.	6
Quadro 6 – Pontuação para as classes da variável Interconectividade das Fraturas.	6
Quadro 7 – Pontuação para as classes da variável Grau de Coerência.	6
Quadro 8 – Pontuação Geomorfológica-Barragem.	7
Quadro 9 – Pontuação Geomorfológica-Reservatório	7
Quadro 10 – Índice Hidrológico	7

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disponibilidade Hídrica do Brasil (Fonte: ANA, 2017)	1
Figura 2 - Fluxograma Metodológico Conceitual.	2
Figura 3 – Mapa Geossistema.	11
Figura 4 – Mapa Porosidade Efetiva.	11
Figura 5 - Mapa Resistência dos Materiais Geológicos.	12
Figura 6 – Mapa Interconectividade de Fraturas.	12
Figura 7 – Mapa Índice Hidrogeologia	13
Figura 8 – Mapa Potencial Geológico para Reservatório.	13
Figura 9 – Mapa Potencial Geológico para Barragem.	14
Figura 10 – Mapa Potencial Geomorfológico para Reservatório.	14
Figura 11 – Mapa Potencial Geomorfológico para Barragem.	15
Figura 12 – Mapa de Vazões Específicas.	15
Figura 13 – Mapa Potencial para Barragem.	16
Figura 14 – Mapa Potencial para Reservatório.	16
Figura 15 – Mapa Potencial para Reservação no Distrito Federal.	17

1. INTRODUÇÃO

A rede de drenagem superficial existente no Distrito Federal é composta por córregos, ribeirões e rios das cabeceiras de três das principais bacias brasileiras, São Francisco, Paraná e Tocantins, portanto, com vazões médias restritas. Estudos sobre recursos hídricos para o Plano Diretor de Água e Esgotos do Distrito Federal (CAESB, 2003) demonstram que algumas drenagens apresentam vazão específica com cerca de 15 até 19 L/s.km². Contudo, em função das áreas de contribuição serem pequenas, as vazões são baixas quando trata do ponto de vista da reservação. Mesmo diante deste quadro de relativa escassez hídrica, o estudo da CAESB (2003) considera a possibilidade de que para o Distrito Federal novas captações a fio d'água em conjunto com a construção de pequenos e médios reservatórios no território podem dobrar a capacidade de abastecimento atual de cerca de 10 m³/s.

Com o advento e a expansão de usos antrópicos para ocupação do solo, o aumento da demanda pela água no Distrito Federal tem apresentado grande incremento. Os estudos no Plano Diretor de Águas e Esgotos do DF (CAESB, 2003) já demonstravam demanda superior à disponibilidade dos mananciais a partir de 2005. De modo geral, o aumento populacional e as características de drenagem superficial do Distrito Federal resultam em que a região tenha uma das menores disponibilidades hídricas *per capita* do país (Figura 1). Neste contexto, a utilização de técnicas que possibilitem a modernização das atuais práticas de localização dos reservatórios e barragens é vital para a manutenção do sistema de abastecimento de água superficial.

Recentes critérios e metodologias aplicados ao estudo de potencial de reservação, em escala de bacia hidrográfica, no estágio de prospecção, levam em consideração conceitos básicos de fatores topográfico, hidrológicos associados a fatores ambientais, sociais e econômicos (Melo, 2013; Almeida et al, 2015, Neiva, 2016). Em razão do número de variáveis envolvidas - tais como altimetria, vazão, geologia, entre outras -, os sistemas de informações geográficas, com suas funções de reunir, integrar, armazenar recuperar, transformar e cartografar dados sobre o mundo real, são considerados uma ferramenta útil na modelagem e otimização de diversos elementos que compõem barragens e reservatório, atuando principalmente, na tomada de decisão na fase de planejamento.

Para o desenvolvimento deste estudo de caracterização do potencial de reservação superficial de água no Distrito Federal, na fase prospectiva, foram considerados apenas os componentes ambientais de influencia diretas na capacidade de reservação. Estes fatores foram: geologia, geomorfologia e hidrologia. Portanto, neste momento serão desconsiderados fatores como necessidade de infraestrutura e restrições ambientais.

Neste contexto, o objetivo do presente texto é elaborar um mapa prospectivo do potencial para reservação tendo como ponto de partida os estudos realizados por Almeida et al, (2015) no desenvolvimento do projeto "Reservação Superficial de Água no Semiárido Brasileiro", uma parceria entre o Instituto de Geociências (IG/UnB) e a Agência Nacional de Águas (ANA).

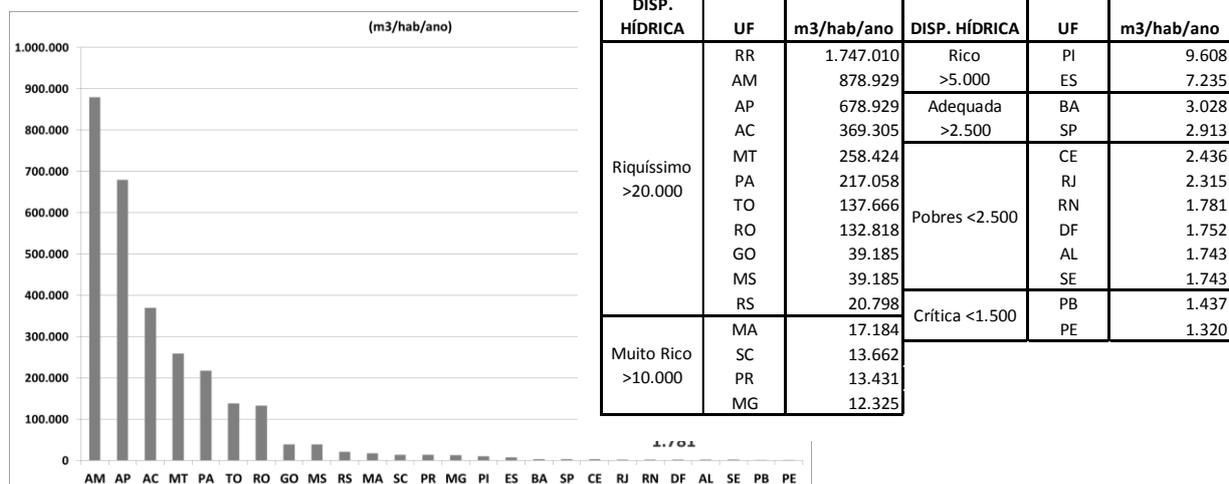


Figura 1 – Disponibilidade Hídrica do Brasil (Fonte: ANA, 2017).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a escolha dos critérios a serem considerados na análise foi elaborado um modelo conceitual a fim de simular a implementação com as principais operações efetuadas em sistema de informações geográficas (Figura 2). Neste estudo foram considerados somente os aspectos ambientais possíveis de serem transpostos espacialmente para índices segundo o potencial ao reservatório ou à construção de barramento, em especial, a partir de dados categóricos e ponderação das variáveis para hierarquização com foco em representar algumas questões básicas: Existe perda de volume? Estabilidade do barramento? Água para encher o reservatório? Condições do terreno para armazenar água e posicionamento da barragem?

Para tanto, a análise de Avaliação Multicritério que compreende um conjunto de métodos que permitem o tratamento simultâneo de aspectos econômicos, sociais, políticos, ambientais, entre outros, em um processo de tomada de decisão (Braga & Gobetti, 1997) teve desenvolvimento baseado no conhecimento de especialistas e/ou em análises quantitativas (padrões pré-estabelecidos pela literatura ou por medições).

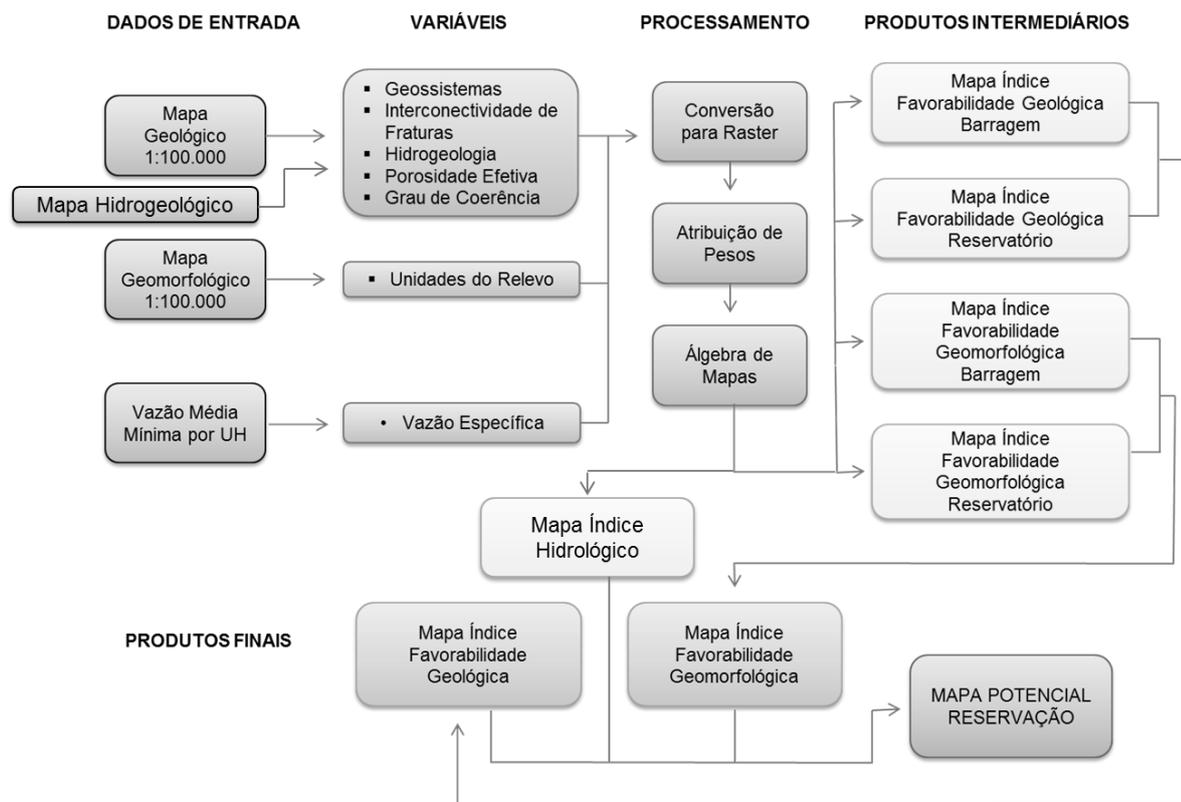


Figura 2 - Fluxograma Metodológico Conceitual.

2.1. Material

Os dados relacionados a área de estudo foram consolidados em quase sua totalidade em instituições como Agência Nacional de Águas – ANA, Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal - ADASA, Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal – TERRACAP e Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SEMA. Os procedimentos iniciais envolveram critérios de disponibilidade e qualidade dos dados, em escalas adequadas para a determinação dos universos totais de variáveis e indicadores adotados para a análise.

A escolha das variáveis foi orientada por pesquisas em prospecção de potenciais ao barramento, em especial os trabalhos de Almeida et al. (2015), que descreve uma proposta de metodologia aplicada para a quantificação do índice de favorecimento à identificação de potenciais locais de barramento no Semiárido Brasileiro; Melo (2013), que utilizou de variáveis em sistema de informações geográficas para a avaliação de potencial hidroelétrico; Costa (2012) que apresenta a descrição dos principais aspectos geológicos ligados à bacias hidrográficas e hidráulicas; CAESB (2003) com informações do Plano Diretor de Água e Esgotos do Distrito Federal, constantes no volume

sobre Concepção de Alternativas para Abastecimento de Água para identificação dos parâmetros aplicados para pré-seleção de mananciais produtores, além de consultas a especialistas e registros existentes.

As distintas bases de dados para o Distrito Federal foram compatibilizadas no ambiente de sistema de informações geográficas do aplicativo ArcGIS (ESRI) para os diferentes planos de informações e aplicações automatizadas ou semi-automatizadas das ferramentas e técnicas objetivando as análises para a quantificação dos critérios para o potencial a reservação. Nesta etapa também foi definido que as variáveis geológicas e geomorfológicas que afetam a área de construção de uma barragem e a área do reservatório são diferentes, e devem apresentar pesos distintos entre suas classes para a elaboração dos índices de potencial á reservação.

2.2. Análise Multicritério Aplicada ao SIG

A análise multicritério denominada AHP foi o modelo adotado para integração das informações na metodologia para análise de suporte à decisão. O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) trata-se de um recurso/técnica para auxiliar na tomada de decisões complexas. Baseado na conversão de preferências em valores numéricos para serem processados e comparados sobre a extensão do problema. Em função da quantidade de variáveis empregadas na formulação de indicadores, o AHP tem importante contribuição na escolha e justificativa, possibilitando a reflexão sobre os possíveis efeitos das variáveis envolvidas em quadros prospectivos. Uma vez construído, o AHP pode ser utilizado para analisar, comparar e priorizar alternativas. Os pesos representam a prioridade dada a cada elemento ou critério, que podem ser organizados em hierarquias, foi adotada a escala apresentada por Saaty (2005).

2.3. Processamento dos Dados

A análise de qualidade e consistência dos dados, com observações manuais e análise topológica foi realizada para permitir uma melhoria das operações algébricas entre os dados de entrada. Algumas inconsistências conceituais e topológicas foram identificadas e corrigidas. Em geral, os erros e inconsistências estavam representados por sobreposições de polígonos e presença de vazios. Os dados foram ainda padronizados para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000. Cabendo mencionar que os dados de geologia foram atualizados para as nomenclaturas definidas em Campos et al, (2013).

Após a análise das informações disponíveis e correção dos dados foram definidos os indicadores geoambientais que foram elaborados a partir dos mapas de geologia (Freitas-Silva & Campos, 1998), hidrogeologia (Campos & Freitas-Silva, 1998), geomorfologia (Novaes Pinto, 1994; Martins & Batista, 1998) e unidades hidrográficas (ADASA, 2012). Alguns campos foram adicionados a estas bases espaciais e entraram como atributos do arquivo shapefile. Com isso, as bases espaciais de referência foram reclassificadas de acordo com as variáveis selecionadas para composição do mapa de potencial a reservação, da seguinte maneira:

- **Índice Geossistemas:** Elaborado a partir do agrupamento das unidades geológicas em conjunto com características geotécnicas semelhantes.
- **Índice Interconectividade de Fraturas:** Representação da distribuição espacial por unidade geológica dos valores de interconectividade de fraturas apresentados em Campos (2010).
- **Índice de Hidrogeologia:** Elaborado a partir do agrupamento das unidades hidrogeológicas (Campos & Freitas-Silva, 1998) com características hidráulicas semelhantes.
- **Índice Porosidade Efetiva:** Representação da distribuição espacial por unidade geológica dos valores de porosidade efetiva apresentados em Campos (2010).
- **Índice Grau de Resistência:** Utilizou-se a proposta modificada de Vaz (1996), com objetivo de representar a resistência do material geológico a compressão uniaxial.
- **Índice Compartimentação Geomorfológica:** Elaborado a partir do agrupamento de unidades geomorfológicas (Novaes Pinto, 1994; Martins & Batista, 1998) em função do potencial para barramento e reservatório.

- **Índice Vazões Específicas:** Representação das vazões específicas por unidade hidrológica a partir dos dados de Vazão Mínima Média fornecidos pela ADASA (2012).

2.4. Definição das Variáveis

Foram identificadas três variáveis técnicas a serem analisadas para a fase prospectiva do planejamento para escolha de locais passíveis a reservação superficial de água: geologia, geomorfologia e hidrologia. Os critérios e parâmetros representam os fatores da engenharia em aspectos físicos naturais que influenciam no posicionamento do eixo de barramento e armazenamento de água em reservatório.

Neste estudo, para a formulação do Índice de Potencial Geológico para Reservação a combinação dos parâmetros compreende o Geossistema, Interconectividade entre Fraturas, Grau de Coerência, Porosidade Efetiva, em conjunto com o parâmetro hidrogeológico representado pelos domínios fraturado e fissuro-cárstico. Enquanto os índices Geomorfológico e Hidrológico são representados pelas unidades do relevo e vazão específica obtida a partir da vazão média mínima (Q_{mmm}), respectivamente.

A partir da elaboração dos três índices, que serão detalhados nos itens a seguir, o indicador para potencial de reservação superficial de água pode ser calculado, de acordo com as equações abaixo. As pontuações para estes parâmetros que compõem os índices foram organizados em hierarquias conforme Saaty, (2005).

- ✓ *Índice Potencial Barramento = Índice Geológico + 2* Índice Geomorfológico + 3* Índice Hidrológico*
- ✓ *Índice Potencial Reservatório = Índice Geológico + 2* Índice Geomorfológico + 2* Índice Hidrológico*
- ✓ *Índice Potencial Reservação = Índice Potencial Barramento + Índice Potencial Reservatório*

2.4.1. ÍNDICE GEOLÓGICO

O Índice Geológico teve elaboração para representar os principais parâmetros geotécnicos relacionados às contribuições para escolha de locais passíveis a reservação superficial de água em uma determinada bacia hidrográfica.

Para os fatores geológicos foram individualizados: Geossistemas; Interconectividade das Fraturas, Porosidade Efetiva e; Grau de Coerência; em conjunto com as características hidrogeológicas dos domínios fraturado e fissuro-cárstico para composição do Índice de Potencial Geológico a Reservação.

Os pesos das variáveis geológicas está apresentada nos Quadros 1 e 2 para barragem e reservatório, respectivamente. A organização das hierarquias e pesos indica que maiores pontuações representam a prioridade em relação ao outro.

Quadro 1 – Pontuação variáveis geológicas -Barragem.

Índice Geológico para o Barramento	
Geossistema	9
Hidrogeologia	7
Porosidade Efetiva	5
Interconectividade das Fraturas	3
Grau de Coerência	3

Quadro 2 – Pontuação variáveis geológicas -Reservatório.

Índice Geológico para o Reservatório	
Geossistema	9
Porosidade Efetiva	7
Hidrogeologia	3
Interconectividade das Fraturas	3
Grau de Coerência	1

Geossistema: Os critérios utilizados para estabelecer as classes de Geossistemas visam agrupar conjuntos geológicos de comportamento geotécnicos semelhantes, para a construção de barramentos e capacidade de reservação superficial. Tendo este agrupamento como guia o mapa geológico atualizado do Distrito Federal na escala 1:100.000. Pode-se sintetizar o processo de classificação dos geossistemas através das seguintes etapas: obtenção dos arquivos geoespaciais atualizado e classificação de acordo com similaridade entre os aspectos geotécnicos das rochas, conforme sistematizado no Quadro 3. A pontuação das classes de Geossistema representa maior potencial geológico a reservação para os maiores valores.

Quadro 3 – Pontuação para as classes da variável Geossistema

Geossistema (Unidades Geológicas) *		
Rocha Metassedimentar	MNPpq2/MNPpq3/MNPpr3/MNPpr4/MNPpa/MNPcmo/NPbt/NPa	7
Unidade Pelito Carbonatada	MNPps/MNPpppc/NPbb	5
Rocha Carbonáticas	MNPcsl/Lentes de calcários e mármore	1

* **Unidades Geológicas** - **MNPcsl**: filitos e calcifilitos / **MNPps**: Siltitos / **MNPpppc**: metassiltitos, quartzitos e rochas carbonáticas / **NPbb**: folhelhos, siltitos e lentes de calcário / **MNPpq2**; **MNPpq3**: Quartzitos / **MNPpr3**; **MNPpr4**: Metarritmitos / **MNPpa**: ardósias / **MNPcmo**: Filitos / **NPbt**: siltitos e folhelhos / **NPa**: xistos.

Hidrogeologia: Segundo Campo & Freitas-Silva (1998) no Distrito Federal, onde a geologia é caracterizada por rochas metamórficas, recobertas por espessos solos, podem ser diferenciados três grandes grupos de aquíferos, que correspondem à classificação maior dos reservatórios subterrâneos de água: Domínio Aquífero Intergranular (Freático ou Poroso), Domínio Aquífero Fraturado e Domínio Aquífero Físsuro-Cárstico. No caso do Distrito Federal, onde há grande variação de tipos litológicos dentro das várias unidades litoestratigráficas, a caracterização mais precisa dos vários sistemas aquíferos requer a subdivisão em subsistemas, evidenciando a real diversificação dos domínios, sistema e subsistemas aquíferos. Para representar a variável Hidrogeologia foram considerados somente os sistemas que compõem os domínios Fraturado e Físsuro-Cárstico (Campos & Freitas-Silva, 1998). Neste estudo, o domínio cárstico está restrito a presença de lentes de calcário, dolomito e mármore discriminadas no mapa geológico (Freitas-Silva & Campos, 1998). Deste modo, a caracterização desta variável pode ser representada pelo Quadro 4, onde as maiores pontuações estão relacionadas a potenciais favoráveis de reservação.

Quadro 4 – Pontuação para as classes da variável Hidrogeologia.

Hidrogeologia		
Fraturado	Rocha Metassedimentar	9
Físsuro-Cárstico	Unidade Pelito Carbonatada	7
Cárstico	Rochas Carbonáticas	1

Porosidade Efetiva: Descreve o volume de vazios sobre o volume total referente ao material geológico. Neste estudo, os valores de porosidade efetiva correspondem aos observados para os aquíferos do Domínio Intergranular (freático), essencialmente representados pelos solos e pelo manto de alteração das rochas (Quadro 5). No Distrito Federal, os sistemas do Domínio Intergranular são compostos por meios geológicos não consolidados, com espessuras saturadas variando de poucos centímetros até 80 metros, com predominância (>60%) de espessuras variando entre 15 e 25 metros, grande extensão e continuidade lateral, heterogêneos e anisotrópicos, ou seja, apresentam variações laterais das propriedades hidráulicas (Campos & Freitas-Silva, 1998). Contudo, os sistemas denominados P₁, P₂, P₃, e P₄ são caracterizados principalmente em função dos parâmetros de espessura saturada e condutividade hidráulica (Tabela 1). Desta forma, a ponderação das classes de porosidade efetiva apresentada no Quadro 5 visa refletir sobre a importância quanto aos aspectos geotécnicos e também hidráulicos, no sentido de englobar riscos de erosão e/ou fuga natural de água ao índice geológico.

Tabela 1 – Valores de porosidade efetiva para os sistemas aquíferos do domínio freático. Fonte: Campos & Freitas-Silva (1998).

DOMÍNIO	SISTEMA	SUBSISTEMA	Condutividade Hidráulica	η_e - %	Solo Predominante
Freático	Sistema P ₁	Deverão ser definidos com o detalhamento da cartografia hidrogeológica.	Alta	10	Latossolos Arenosos e Neossolos Quartzarênicos.
	Sistema P ₂		Moderada	12	Latossolo Argilosos.
	Sistema P ₃		Baixa	5	Plintossolos e Argissolos.
	Sistema P ₄		Muito Baixa	3	Cambissolo e Neossolo Litólico.

Quadro 5 – Pontuação para as classes da variável Porosidade Efetiva.

Porosidade Efetiva ($\eta_e\%$)		
Sistema P4 (3%)	Cambissolo e Neossolo Litólico	9
Sistema P3 (5%)	Plintossolos e Argissolos	7
Sistema P1 (10%)	Latossolos Arenosos e Neossolos Quartzarênicos	5
Sistema P2 (12%)	Latossolo Argilosos	3

Interconectividade entre Fraturas: Trata-se de um elemento crítico fundamental para o desenvolvimento de projetos de barramento e capacidade à reservação. Em especial, na situação de condicionamento da rede de drenagem superficial ao fraturamento do maciço rochoso, que constitui um fácil caminho de percolação das águas subterrâneas, favorecendo a possibilidade de fuga da água do reservatório por infiltrações ao longo de seus limites marginais e eventuais infiltrações sob a própria barragem.

No Distrito Federal, em função da grande presença de quartzitos, há uma grande distribuição das descontinuidades por todo o maciço rochoso, já que o comportamento rúptil deste tipo favorece a manutenção da abertura do fraturamento, além de grande interconectividade das fraturas (Campos, 2010). O Quadro 6 apresenta as pontuações para a variável Interconectividade das Fraturas. As menores pontuações estão relacionadas aos maiores índices de Interconectividade entre as Fraturas e contribuem para o índice geológico no sentido de menor potencial à reservação. Contudo, cabe ainda mencionar que os maiores valores de Interconectividade de Fraturas observados para a região do Distrito Federal são consideradas de moderado fraturamento, de acordo com a classificação do maciço rochoso estabelecido pela ABGE (1983). A densidade desses fraturamentos é igualmente fundamental a influência do grau de abertura das fraturas, contudo estes dados não foram considerados nesse estudo.

Quadro 6 – Pontuação para as classes da variável Interconectividade das Fraturas.

Interconectividade das Fraturas *		
MNPcmo / MNPpa / MNPpr4 / NPbt / NPbb	< 1	9
NPa	1.5	7
MNPps	2	5
MNPpppc	3	3
MNPcsl / MNPpr3 / MNPpq2 / MNPpq3 / lentes de calcário e mármore	3.5	1

* **Unidades Geológicas** - **MNPcsl**: filitos e calcifilitos / **MNPps**: Siltitos / **MNPpppc**: metassiltitos, quartzitos e rochas carbonáticas / **NPbb**: folhelhos, siltitos e lentes de calcário / **MNPpq2**; **MNPpq3**: Quartzitos / **MNPpr3**; **MNPpr4**: Metarritmitos / **MNPpa**: ardósias / **MNPcmo**: Filitos / **NPbt**: siltitos e folhelhos / **NPa**: xistos.

Grau de Coerência: Este parâmetro objetiva a representação da resistência da rocha a compressão uniaxial. Segundo Campo & Freitas-Silva (1998) no Distrito Federal, a geologia é caracterizada por rochas metamórficas. Portanto, de acordo com a classificação proposta por Vaz (1996), na região de estudo ocorre predomínio de rochas com resultados ao ensaio de compressão uniaxial que variam entre 50 -260 MPa, consideradas rochas duras e médias, favorecendo aspectos de estabilidade e estanqueidade ótimos, em especial para o barramento. O Quadro 7 apresenta a pontuação aplicada para os conjuntos de unidades geológicas nos Distrito Federal. Os maiores valores sinalizam maior favorecimento ao potencial de reservação.

Quadro 7 – Pontuação para as classes da variável Grau de Coerência.

Grau de Coerência *		
Duras	MNPpq3	7
Médias	MNPpq2/MNPpr3/MNPpr4/MNPpa/MNPcmo/NPbt/NPa/MNPps/ NPpppc/NPbb/ MNPcsl/Lentes de calcários e mármore	6

* **Unidades Geológicas** - **MNPcsl**: filitos e calcifilitos / **MNPps**: Siltitos / **MNPpppc**: metassiltitos, quartzitos e rochas carbonáticas / **NPbb**: folhelhos, siltitos e lentes de calcário / **MNPpq2**; **MNPpq3**: Quartzitos / **MNPpr3**; **MNPpr4**: Metarritmitos / **MNPpa**: ardósias / **MNPcmo**: Filitos / **NPbt**: siltitos e folhelhos / **NPa**: xistos.

2.4.2. ÍNDICE GEOMORFOLÓGICO

As características geológico-geotécnicas complementadas pelas informações geomorfológicas aprofundam o estudo dos arranjos do aproveitamento de água superficial. Mapas geomorfológicos podem indicar declividades elevadas a distâncias próximas aos cursos d'água, indicando favorabilidade ao posicionamento dos eixos de barramento (Melo, 2013). Para elaboração do Índice Geomorfológico ao barramento e reservatório foram consideradas as unidades de compartimentação do relevo apresentadas por Novaes Pinto (1994) e Martins & Batista (1998) em conjunto com estudos recentes de compartimentação do relevo utilizando o modelo digital de elevação do Distrito Federal em escala 1:10.000 (GDF, 2014).

Os Quadros 8 e 9 apresentam, respectivamente, as pontuações para os índices geomorfológicos de barragens e reservatórios. Observa-se que os maiores valores de pontuação sinalizam para as unidades do relevo com maior favorecimento a reservação.

Quadro 8 – Pontuação Geomorfológica-Barragem.

Índice Geomorfológico para o Barramento	
Plano Intermediário	9
Rampa Íngreme	7
Vale Dissecado/Rebordo	6
Plano Elevado	1

Quadro 9 – Pontuação Geomorfológica-Reservatório

Índice Geomorfológico para o Reservatório	
Plano Intermediário	9
Vale Dissecado	7
Plano Elevado/Rampa Íngreme/Rebordo	1

2.4.3. ÍNDICE HIDROLÓGICO

A vazão específica é a relação entre a vazão e a área da bacia hidrográfica. Serve como um indicador direto que permite comparar o nível da produção de água entre bacias hidrográficas. Os valores de vazão específica correspondem ao parâmetro quantitativo para o índice hidrológico, permitindo comparar e hierarquizar regiões com maior potencial hídrico ou riscos hidrológicos. Os índices calculados foram definidos a partir de valores de referência

Quadro 10 – Índice Hidrológico

Índice Vazão Específica (L/s/km ²)	
15,1 - 19	9
10,1 - 15	7
8,1 - 10	6
5,3 - 8	5
5,2	3

obtidos das séries de vazão e chuvas estimadas para cada unidade hidrológica de análise. Deste modo, estabeleceu-se a classificação hierárquica das unidades hidrológicas no Distrito Federal, possibilitando associar um determinado número oriundo de um escalonamento realizado no conjunto desses valores, que corresponde ao índice hidrológico apresentado no Quadro 10. Nesta metodologia a unidade hidrológica de menor potencial hídrico corresponde ao índice de valor 3 e com maior ao valor 9.

2.5. Álgebra de Geo-Campos

A álgebra de geo-campos é uma extensão da álgebra tradicional, em que existe um conjunto de operadores, sendo que as variáveis utilizadas são campos geográficos (Câmara, 2002). A modelagem cartográfica envolve modelos expressos em mapas, sendo tal definição proposta por Tomlin (1990), assim um modelo cartográfico pode ser simplificado a uma coleção de mapas ou camadas de mapas pertencentes a uma área comum e operações entre seus elementos. Este modelo de camadas pode ser visualizado por um conjunto de matrizes ou imagens a um registro comum (representação raster), onde cada camada de informação representa uma variável espacial descrevendo um aspecto da realidade (Burrough & Mcdonell 1998). Estes operadores manipulam um, dois ou mais geo-campos, sendo que cada geo-campo descreve um atributo diferente ou um mesmo atributo com datas de aquisição diferentes.

Tomlin (1990) foi o primeiro autor a definir mapas como elementos que associam um valor quantitativo (escalar, ordinal, cardinal ou intervalar) ou qualitativo (nominal) para cada local de uma área de estudo; e defendeu

a realização de operações matemáticas entre esses elementos de acordo com a vontade e bom-senso do modelador, sendo essa técnica, a precursora para o que definimos hoje como álgebra de geo-campos.

Portanto, os mapas de índices deste estudo foram convertidos para o formato raster com pixels de 5 metros, para posterior incremento dos pesos e realização da álgebra de geo-campos. E de acordo com os critérios estabelecidos quanto maior os valores do pixel maior o potencial a reservação. A aplicação desta técnica teve como resultado a construção dos mapas de Potencial Geológico ao Barramento e Reservatório; Potencial Geomorfológico ao Barramento e Reservatório e por fim, o Mapa Potencial à Reservação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas apresentados pelas figuras 3 até 15 mostram a distribuição espacial das variáveis e do potencial para reservação no Distrito Federal. De acordo com os mapas das figuras 3 até 7 é possível observar, em particular as contribuições indesejáveis para aspectos geológicos que segundo Costa (2012) englobam: Processos Erosivos e Assoreamento; Instabilidade de Encostas; Fugas Naturais e Sismicidade Induzida. Destacado as unidades de rochas carbonáticas, índice de interconectividade de fraturas com valores acima de 3.5 fraturas/metro e sistemas aquíferos cársticos. De modo geral, os parâmetros de grau de coerência e porosidade efetiva não sinalizam zonas locais de riscos a reservação.

As figuras 8 e 9 apresentam os mapas de potencial geológico para reservatórios e barragens, respectivamente. Observa-se que a região norte do Distrito Federal apresenta maiores concentrações de áreas com restrições a reservação e áreas de menor expressão ocorrem preferencialmente nas regiões com simultaneidade de altos valores para interconectividade de fraturas e porosidade efetiva. De modo geral, os resultados para o mapa de potencial geológico para reservação sinalizam que áreas de médio a elevado potencial para reservação predominam no território.

As figuras 10 e 11 apresentam a distribuição de potencial geomorfológico para reservação. Portanto, os mapas em questão destacam as condições geomorfológicas adequadas para a presença de ombreiras ou estruturas que permitam manter um reservatório eficiente. No sistema hidrológico do Distrito Federal os cursos d'água apresentam características típicas de drenagem de área de planalto onde são frequentes os desníveis e os vales encaixados, condições geomorfológicas mais favoráveis a reservação.

A figura 12 apresenta a distribuição das vazões específicas para cada unidade hidrográfica do Distrito Federal. Com destaque para as sub-bacias do Paranoá, Ribeirão do Gama e Córrego do Bananal, onde ocorrem os valores de 19 e 15 L/s.km², respectivamente os dois maiores observados para a região do Distrito Federal. Correspondendo as principais áreas de influência para manutenção do Lago Paranoá.

Por fim, os mapas das figuras 13, 14 e 15 mostram respectivamente os potenciais para barramento, reservatório e a soma destes produtos, denominado de Mapa de Potencial para Reservação. Observar-se que as barragens já existentes, Santa Maria, Paranoá e Descoberto localizam-se em classes de alto potencial para reservação, de acordo com os resultados alcançados por este estudo.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados desenvolvidos foi possível mapear os locais mais susceptíveis para posicionamento do barramento e reservatório. Isso contribui na identificação de técnicas em geoprocessamento para análises de alternativas para implantação de projetos de reservação no Distrito Federal em fases prospectivas de planejamento. Os resultados obtidos com a escolha das bases de geologia, hidrogeologia, geomorfologia e hidrologia sugerem que outras dimensões das ciências podem ainda ser empregadas de forma integrada para aperfeiçoar as fases posteriores à etapa prospectiva.

Os critérios e pesos adotados nesta pesquisa foram apresentados como propostas iniciais orientadas pelo conhecimento de especialistas para avaliação multicritério e por outros estudos em escala regional para o território brasileiro, e podem ser modificados e atualizados conforme a disponibilização de base de dados com maior

amadurecimento organizacional e com a elevação do nível de exigência da sociedade. Com isso, as novas pesquisas nesta área, com novos objetivos, critérios e pesos para avaliação do potencial de reservação podem incluir a aplicação da metodologia apresentada nesta pesquisa para barramentos já construídos ou apresentados como alternativas de propostas ao abastecimento superficial de água para o Distrito Federal.

Nessa pesquisa as informações espaciais e os atributos obtidos em diferentes fontes e formatos possibilitaram a geração de mapas derivados factíveis de gerar informações mais adequadas na avaliação do potencial de reservação. Contudo, os serviços ofertados pelas instituições que tratam de informações de dados públicos e políticas setoriais deveriam focar no gerenciamento de uma base de dados geoespaciais com garantia de controle da qualidade das informações, com possibilidades de assegurar maior segurança, confiabilidade, facilidade e acessibilidade das informações setoriais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA E ENGENHARIA (1983). Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. São Paulo, 1983.

ADASA (2012). Revisão e Atualização do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal. Brasília. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal – ADASA Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal – SEMARH. Relatório Final, v.1, Diagnóstico. 789p. + Anexos.

ALMEIDA F.C.; SOUTO F.M.G; ROIG H.L., (2015). Nota Técnica nº 2/2015/COSFI / Documento nº: 00000.018934/2015-92. Agência Nacional de Águas (ANA). Relatar a metodologia aplicada para a quantificação do índice de favorecimento à identificação de potenciais locais de barramentos no Semiárido Brasileiro afeto exclusivamente à variável geomorfológica, presente no projeto Reservação Superficial de Água no Semiárido Brasileiro.

ANA – Agência Nacional de Águas (2017). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017.

BRAGA, B. & GOBETTI, L. (1997). Análise multiobjetivo. In: Porto, R.L. et al. (1997). Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH.

BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems (Oxford University Press, New York), 1998. 190 p.

CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (2003). Plano Diretor de água e Esgoto do Distrito Federal, 2003.

CÂMARA, G; MONTEIRO, A. M.; CARVALHO, M., (2002)- —Análise Espacial e Geoprocessamento - Curso on-line, INPE.

CAMPOS, J.E.G. Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal. Volume II :Meio Físico. SEDUMA, GDF. Subprodutos 3.1 e 3.2.

CAMPOS, J.E.G.; DARDENE, M.A.; FREITAS-SILVA, F.H.; MARTINS-FERREIRA, M.A.C. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na Porção Externa da Faixa Brasília. Braz. J. Geol, São Paulo 43(3):461- 476p

CAMPOS, J.E.G. & FREITAS-SILVA, F.H. Hidrogeologia do Distrito Federal (1998). In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal, Brasília, IEMA / SEMATEC / UnB, 1998. p.1-84, (Vol. IV- Relatório Técnico).

COSTA, W. D. Geologia de barragem. ISBN 978-85-7975-054-0. Capítulo 2, Fases e métodos de investigação geológico-geotécnica em barragens, p. 31 -41. Editora Oficina de Textos, 2012.

FREITAS-SILVA, F.H. & CAMPOS, J. E., (1998). Geologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília: SEMATEC: IEMA: MMA-SRH.

GDF (2014). In: ZEE-DF - Zoneamento ecológico e econômico do Distrito Federal. Subproduto 3.1 – Relatório do Meio Físico e Biótico. Brasília, 2014.

- MARTINS, E.S. & BAPTISTA, G.M.M., (1998). Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. IEMA/SEMATEC/UnB: Brasília, Vol. 1. Parte II. 53p. 1998
- MELO, M.S., (2013). Avaliação de potencial hidroelétrico com aplicação de sistema de informações geográficas. 2013. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília.
- NEIVA R.O.G., (2016). Geoprocessamento Aplicado a Geração de Mapas de Favorabilidade à Construção de Barragens e Reservatórios. Monografia de Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental. Instituto de Geociências/UnB.
- NOVAES PINTO M., (1994). Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: Novaes Pinto M. (org.) Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. 2ª edição, Brasília, Editora UnB, p. 285-320. 1994
- SAATY, T. L., (2005), Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs and Risks, 1st ed., Pittsburgh: RWS Publications.
- TOMLIN, C. D. Geographic Information System and Cartographic Modelling. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1990. 249 p.
- VAZ, L.V., (1996). Classificação genética de solos e horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. Solos e Rochas, São Paulo, v. 19, n 2, p.117-136.

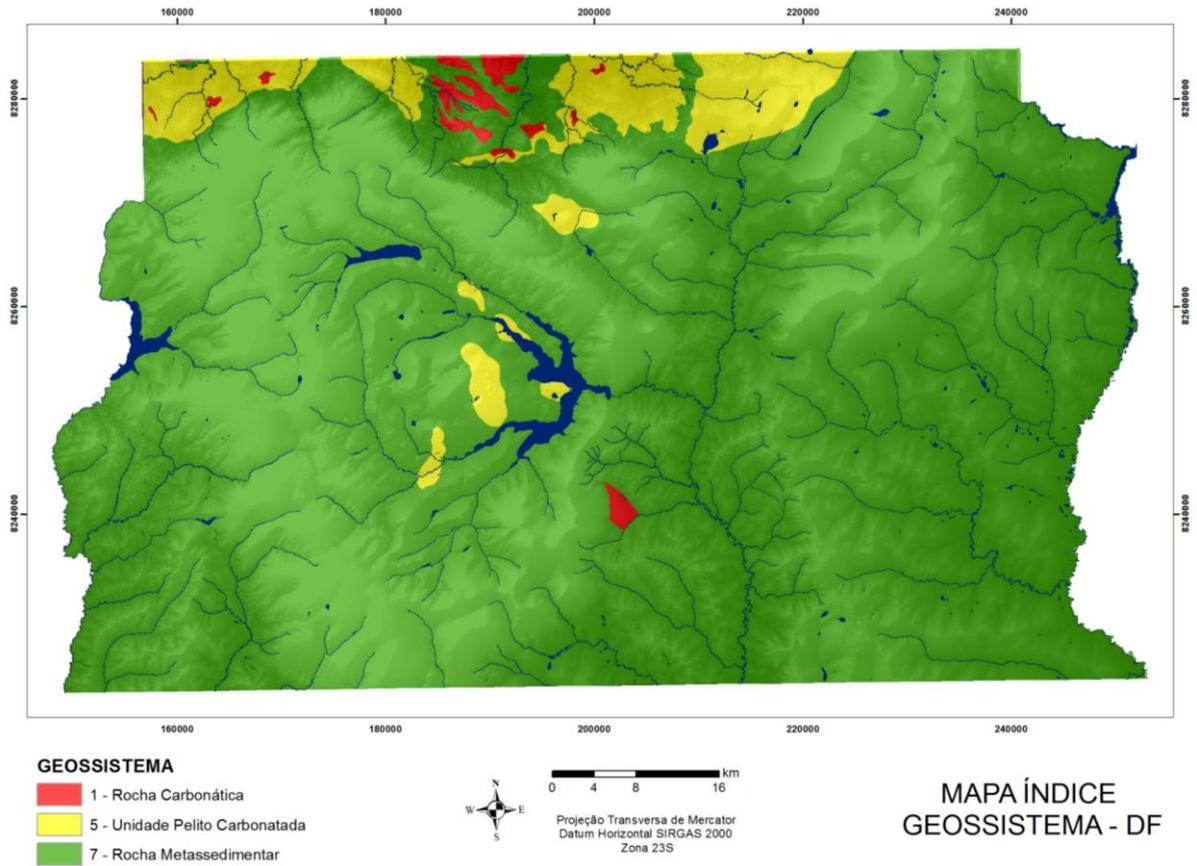


Figura 3 – Mapa Geossistema.

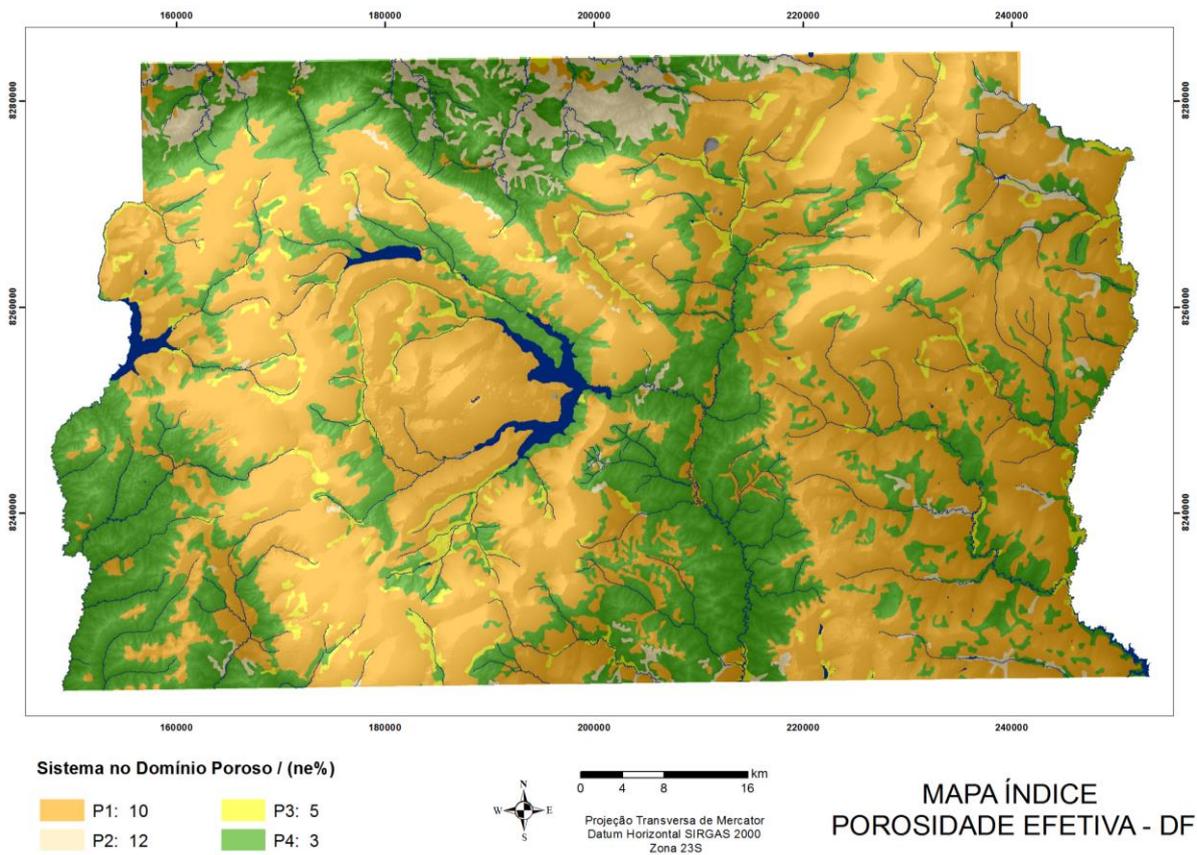


Figura 4 – Mapa Porosidade Efetiva.

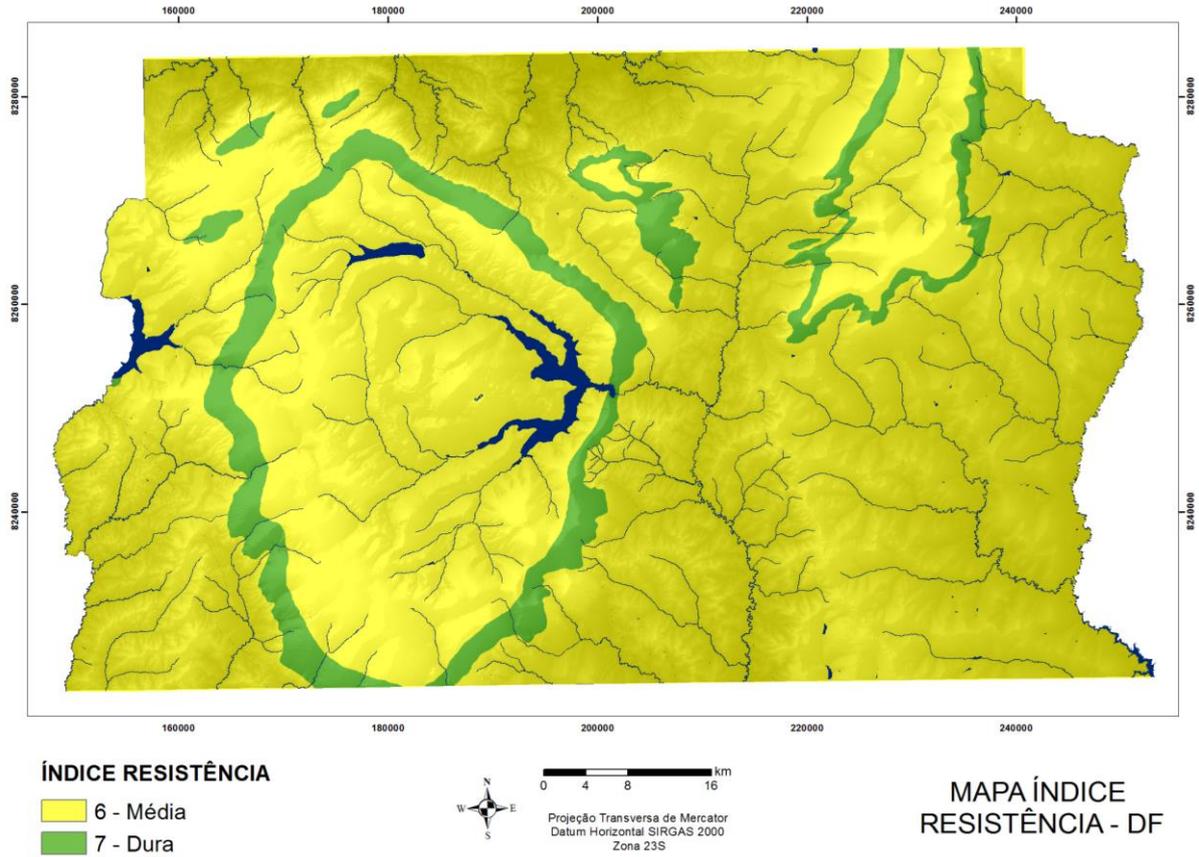


Figura 5 - Mapa Resistência dos Materiais Geológicos.

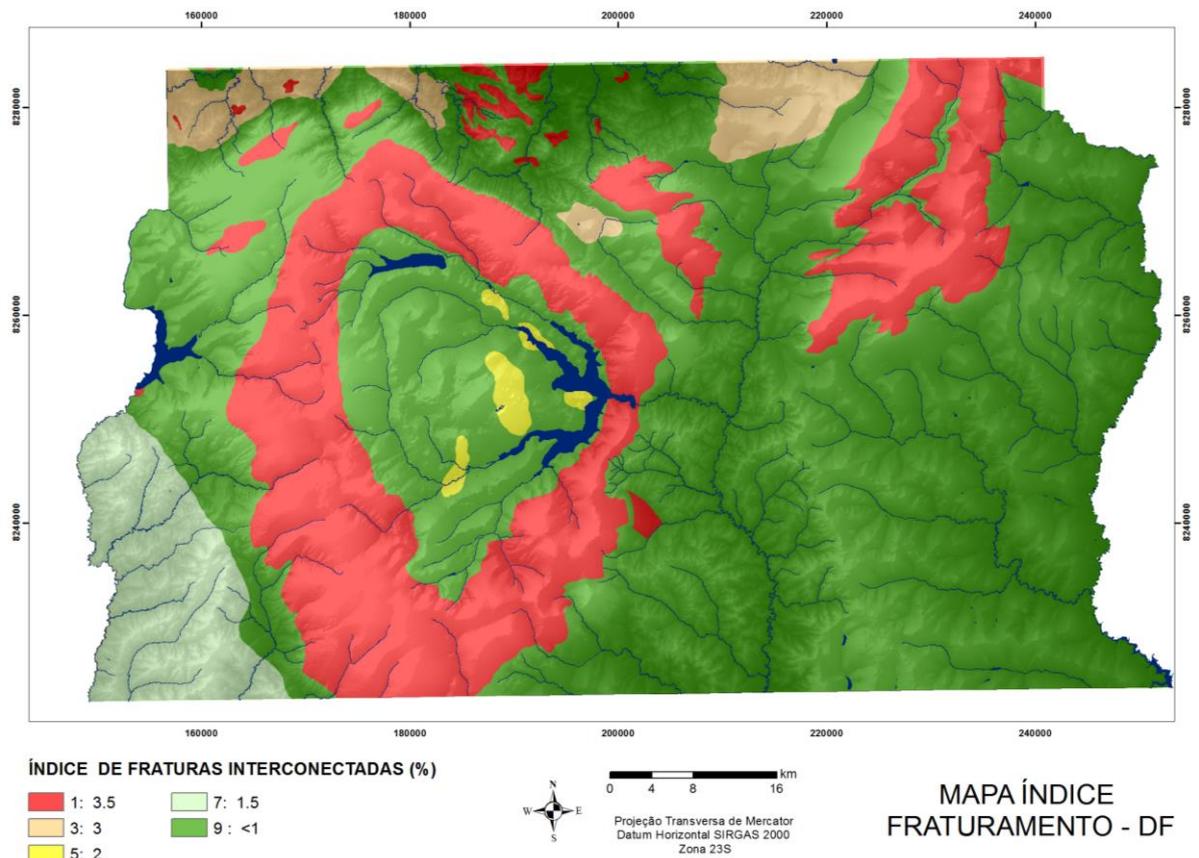


Figura 6 – Mapa Interconectividade de Fraturas.

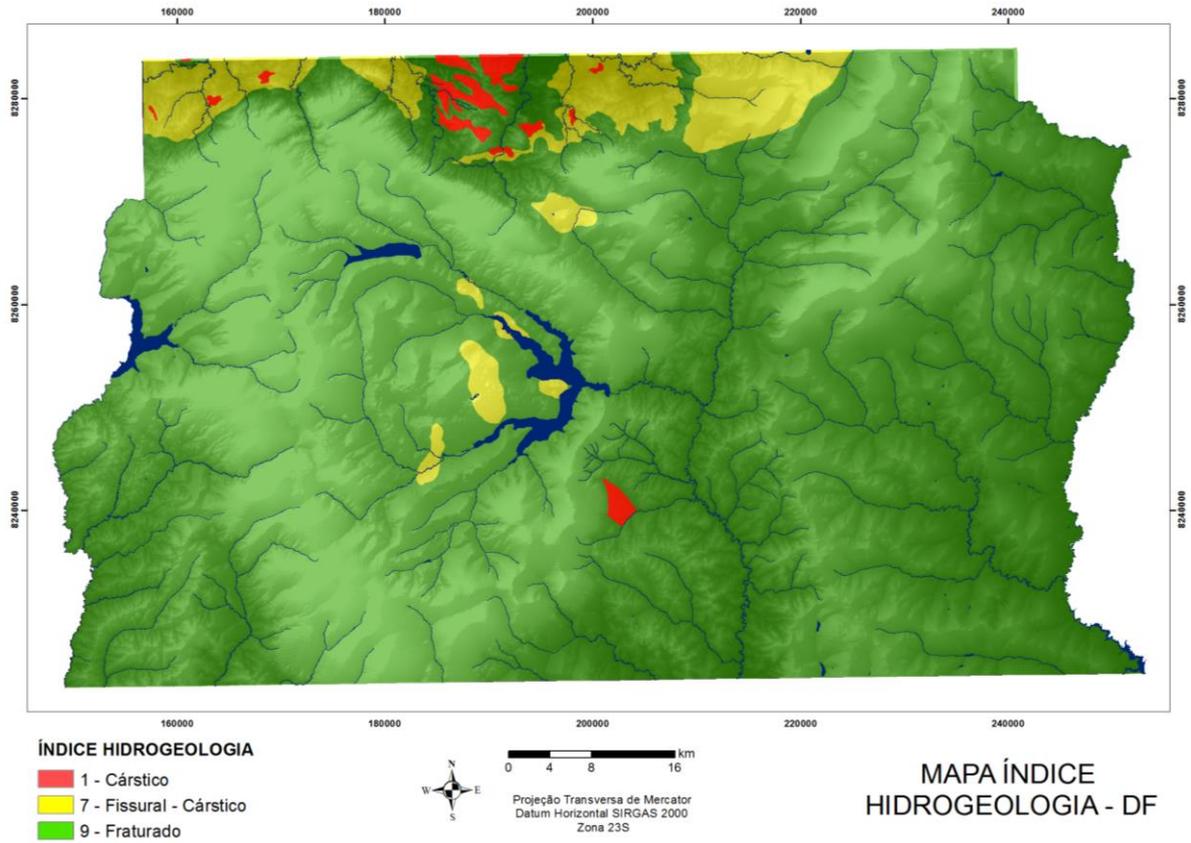


Figura 7 – Mapa Índice Hidrogeologia

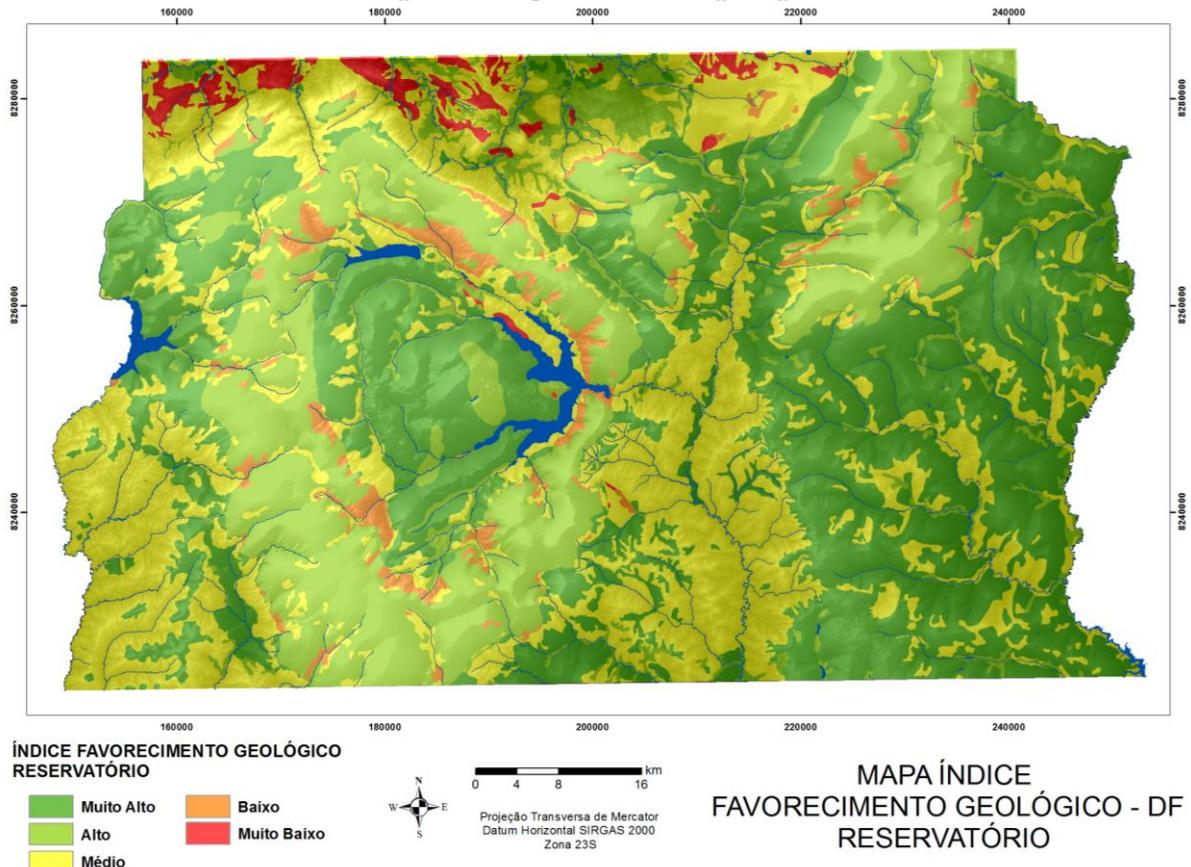


Figura 8 – Mapa Potencial Geológico para Reservatório.

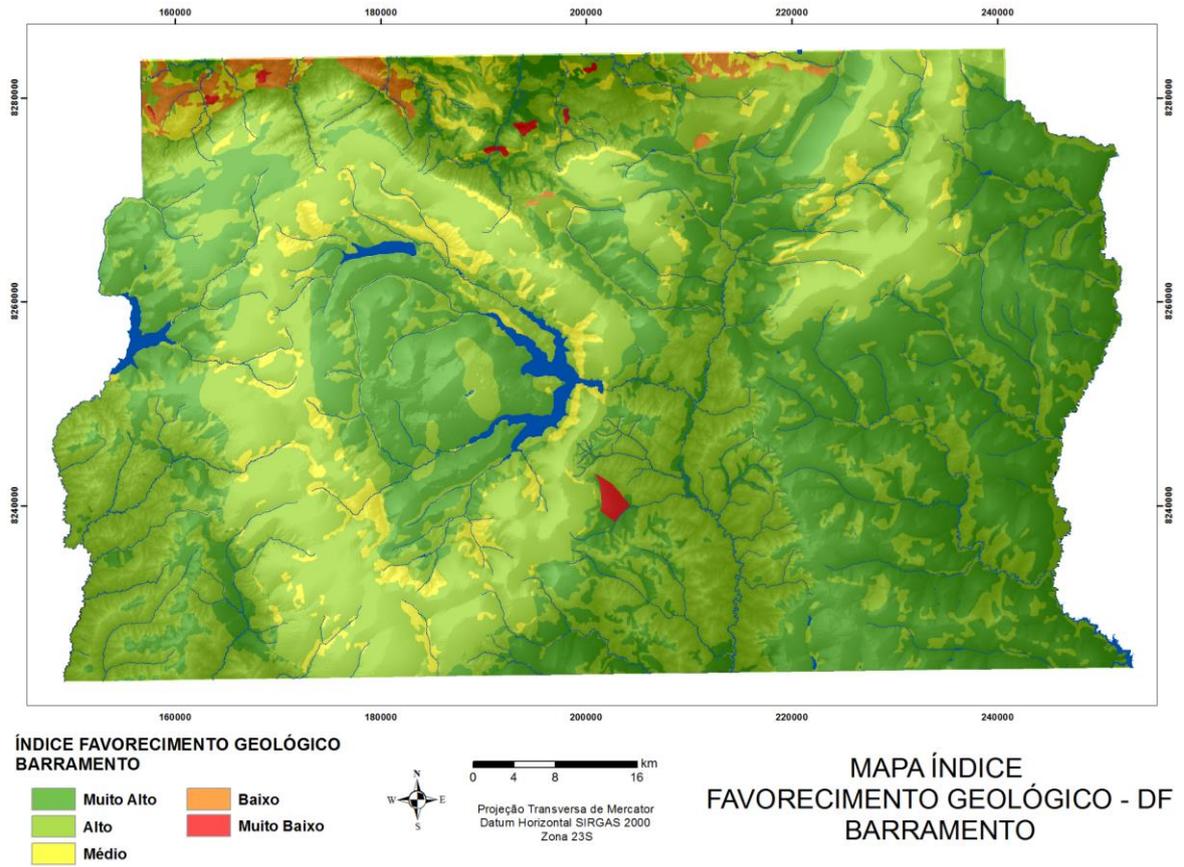


Figura 9 – Mapa Potencial Geológico para Barragem.

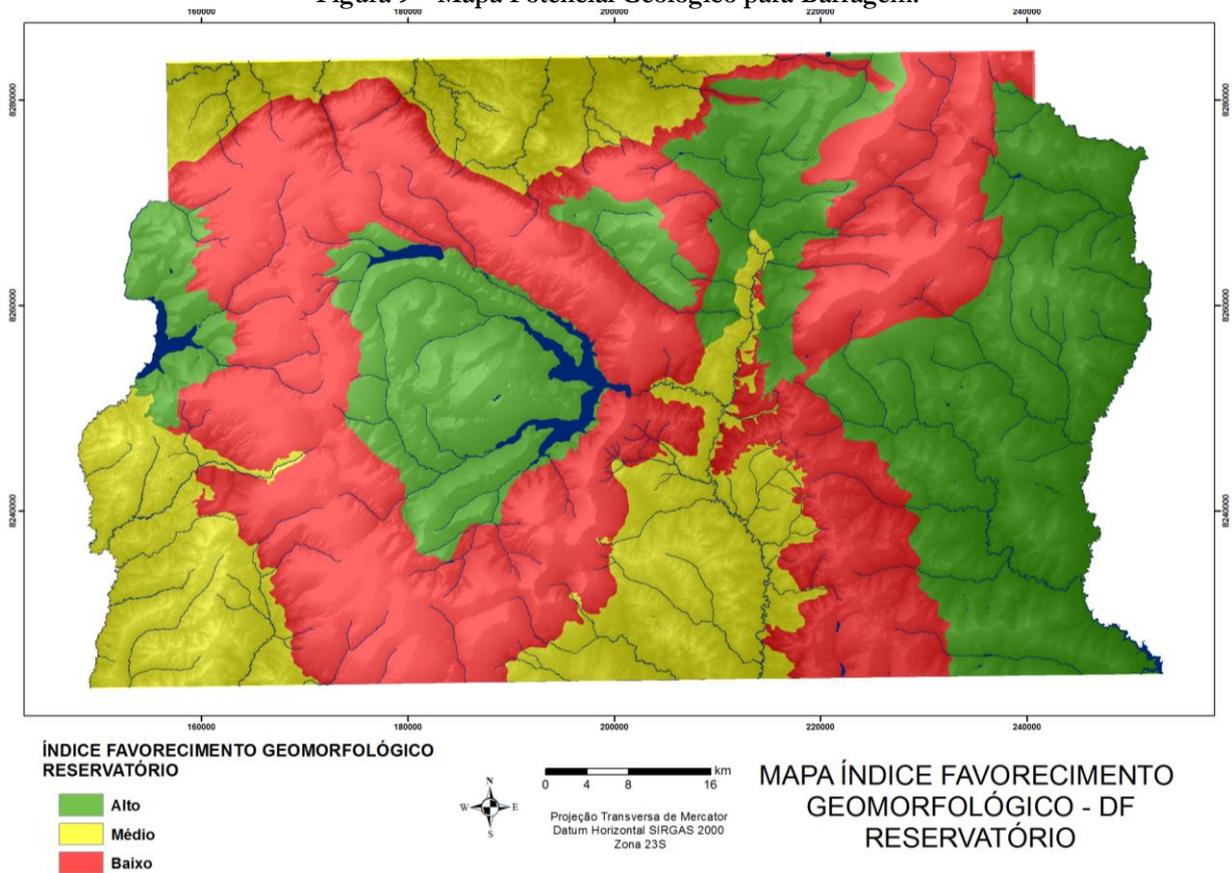


Figura 10 – Mapa Potencial Geomorfológico para Reservatório.

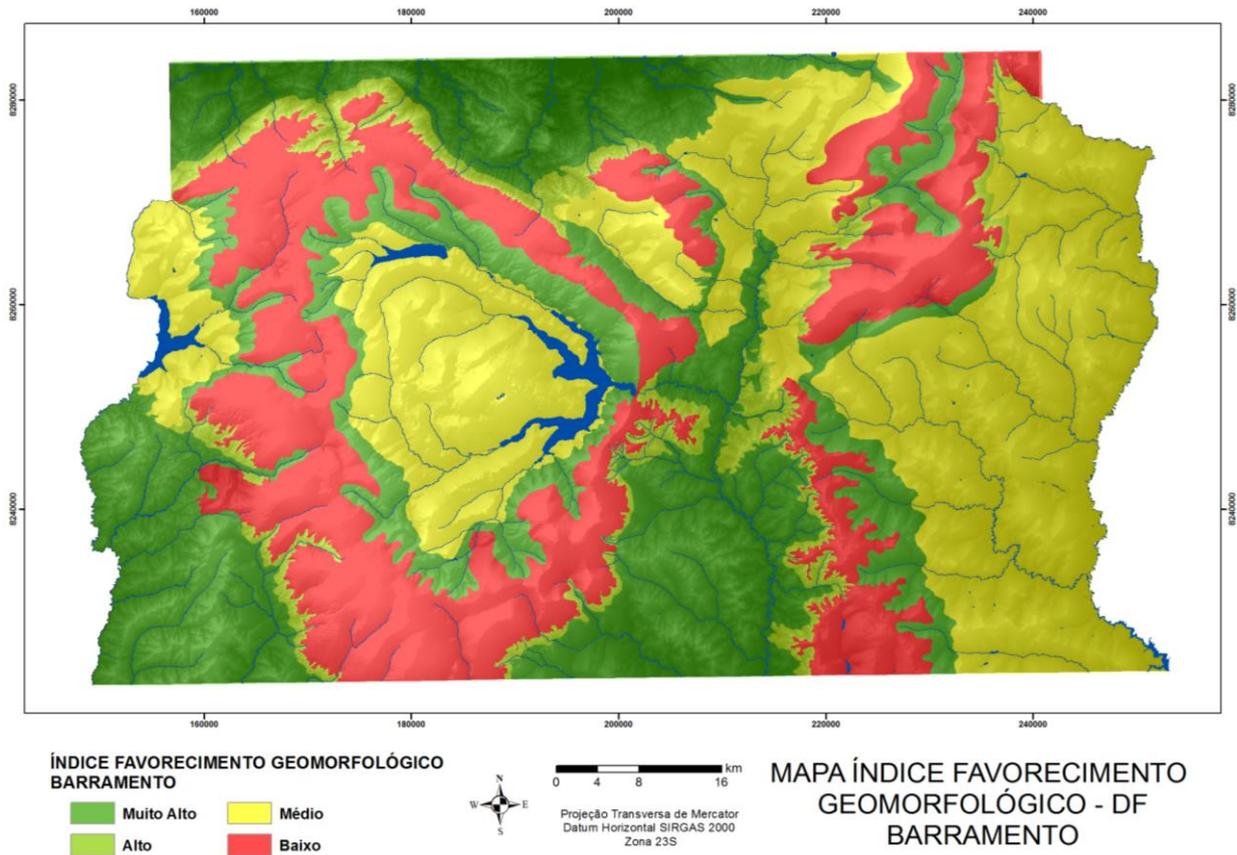


Figura 11 – Mapa Potencial Geomorfológico para Barragem.

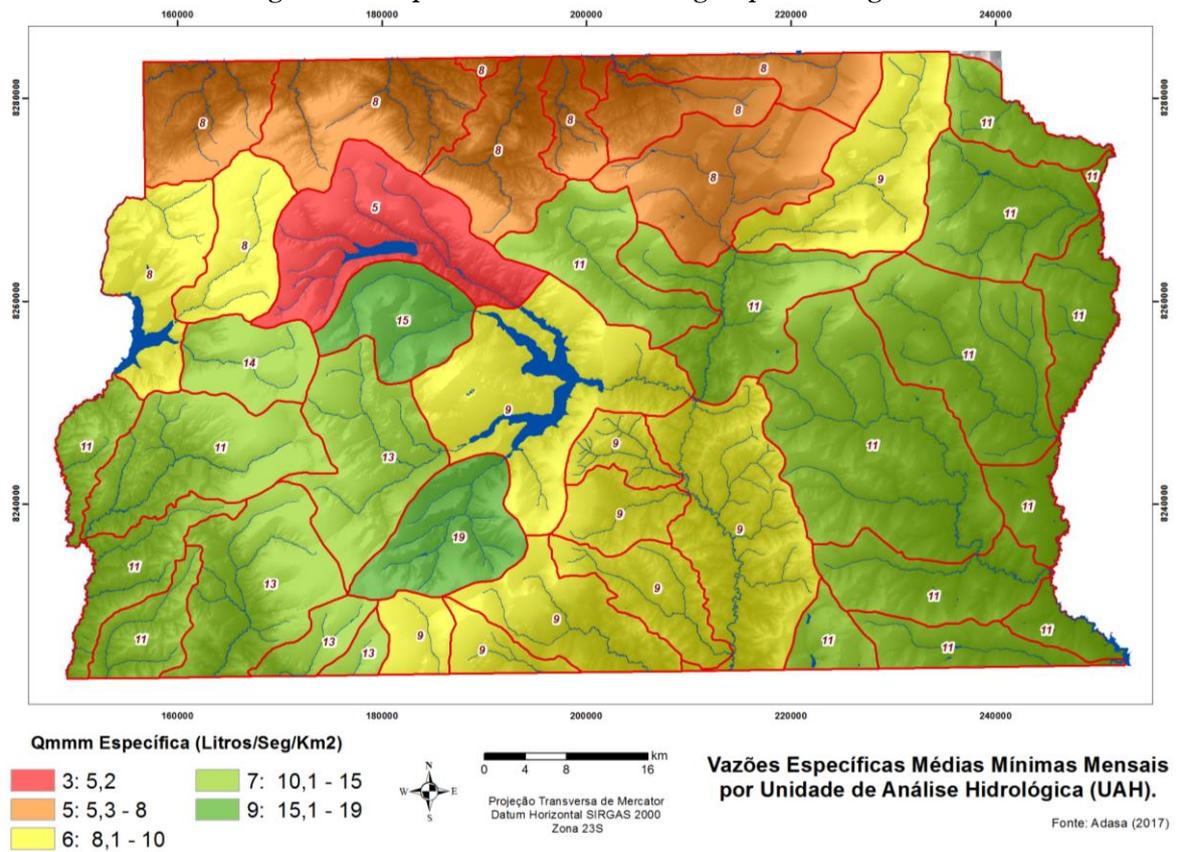


Figura 12 – Mapa de Vazões Específicas.

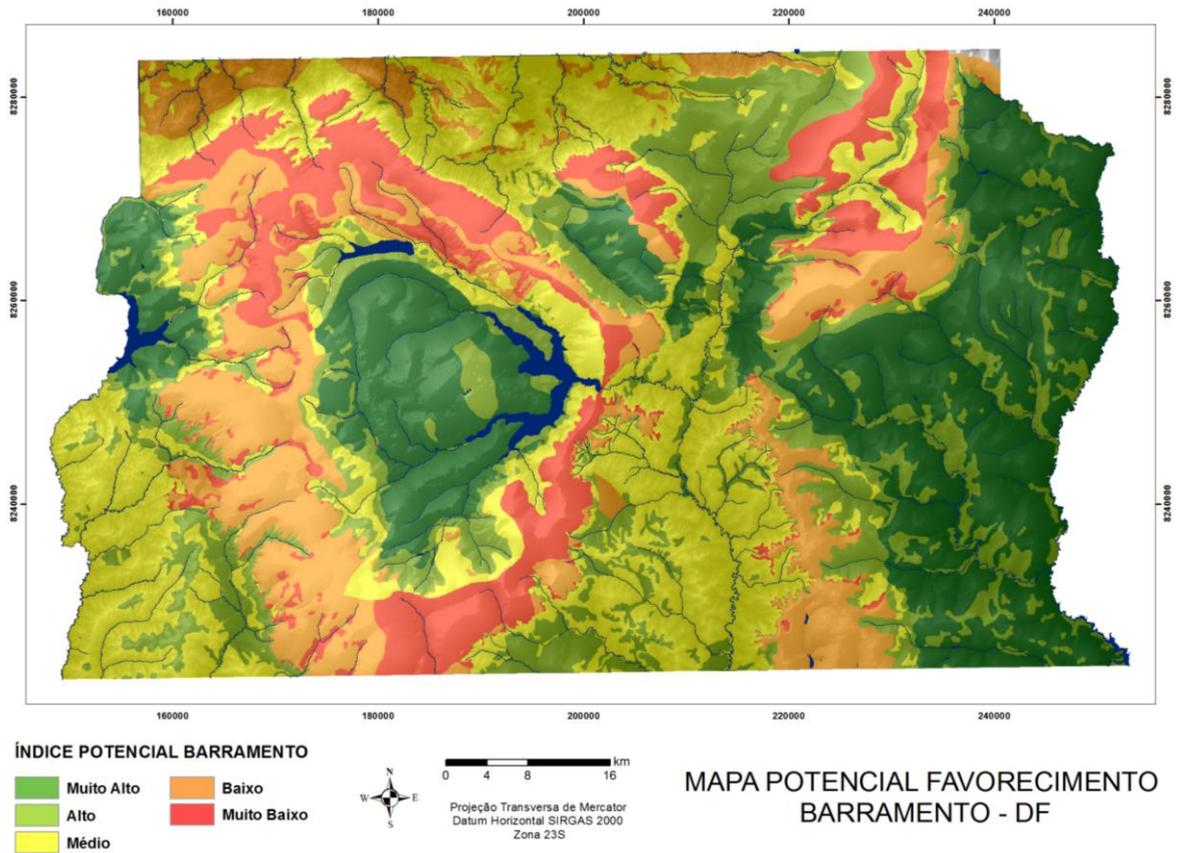


Figura 13 – Mapa Potencial para Barragem.

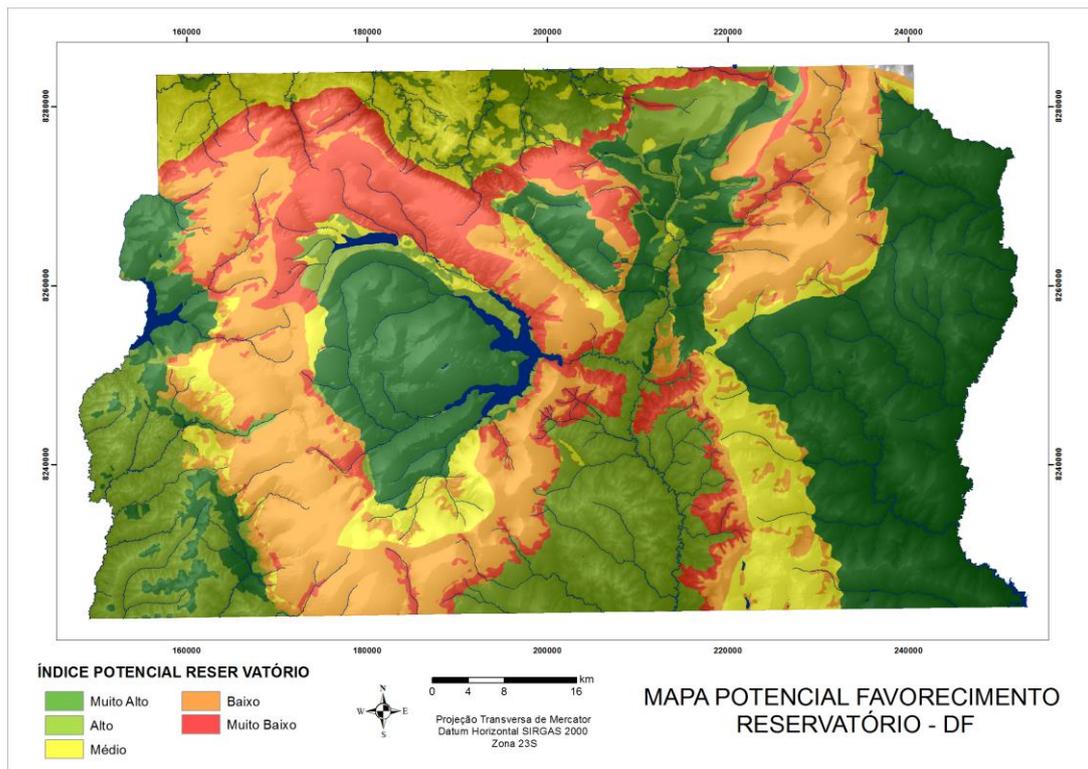


Figura 14 – Mapa Potencial para Reservatório.

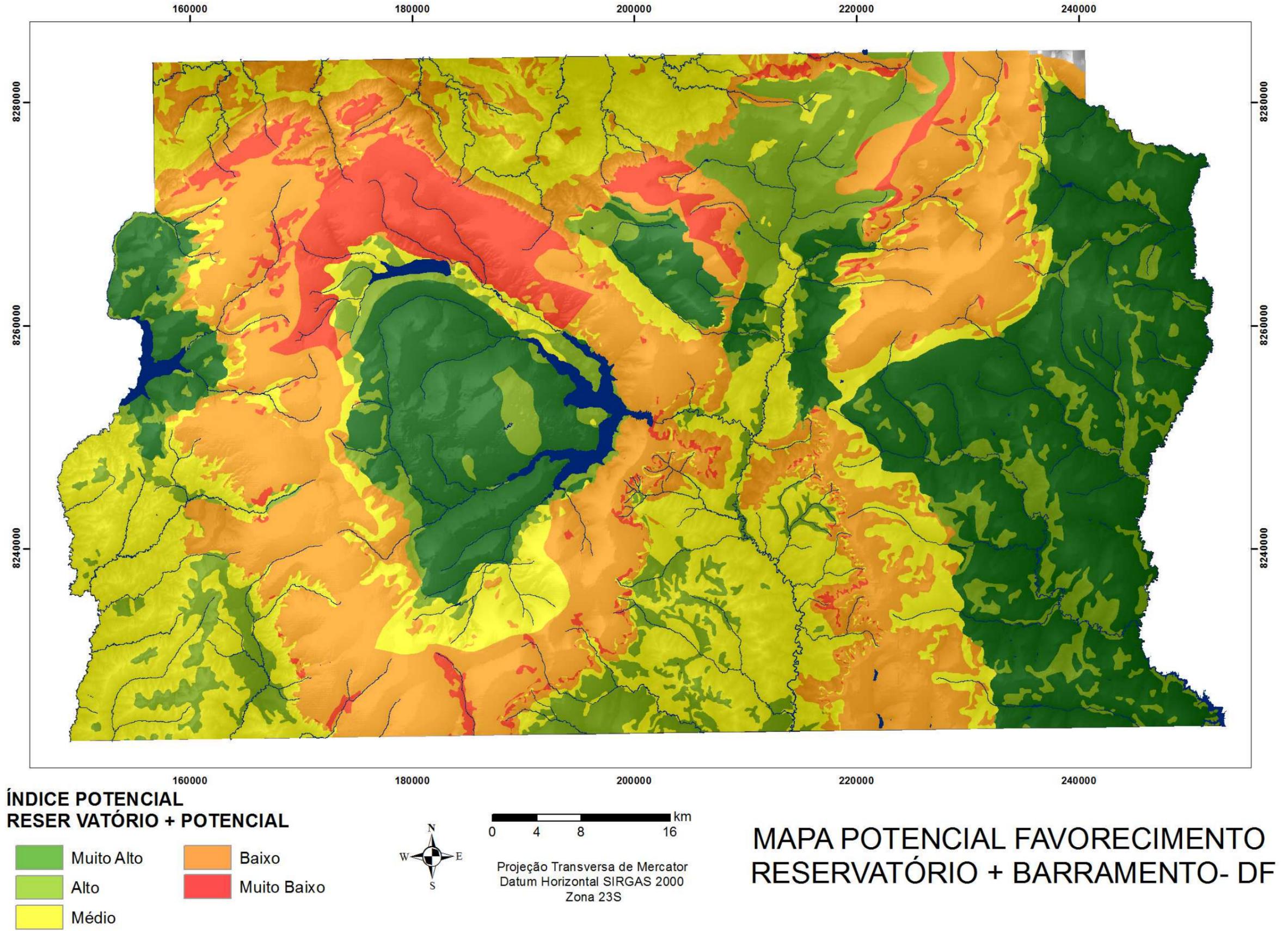


Figura 15 – Mapa Potencial para Reservação no Distrito Federal.