



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Definição de Áreas Prioritárias de Restauração Florestal na Bacia Hidrográfica do Guapi-Macacu/ RJ, Rio de Janeiro

Ciro Lótfi Vaz ¹, André de Souza Avelar ²

¹ Doutor em Planejamento Territorial e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/PPGG/GRUPO LIEG)², Av. Athos da Silveira Ramos, 274, sala H1022 - Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - CEP RJ, 21941-916, (21) 99987-1903. cirovaz.rj@gmail.com. ² Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/PPGG/GRUPO LIEG), Av. Athos da Silveira Ramos, 274, sala H1022 - Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - CEP RJ, 21941-916, (21) 99172-4633. andreavelar@acd.ufrrj.br.

Artigo recebido em 29/08/2024 e aceito em 01/12/2025

RESUMO

O estudo teve como objetivo delimitar áreas prioritárias para a restauração florestal na bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, utilizando análises espaciais integradas para otimizar a tomada de decisão. Foram avaliadas variáveis ambientais e hidrológicas a fim de estabelecer um índice de Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica e um índice de Potencialidade Ambiental para Restauração Florestal, possibilitando a classificação do território segundo seu grau de prioridade para restauração. A metodologia envolveu o mapeamento de uso e cobertura do solo na escala de 1:25.000 e a aplicação de uma abordagem multicritério baseada na integração de geotecnologias e modelagem espacial. Foram utilizados dados de sensoriamento remoto, análise de variáveis hidrológicas e fisiográficas, além da identificação de fragmentos florestais para avaliar o potencial de regeneração natural. A priorização das áreas foi conduzida por meio de álgebra de mapas e análise de indicadores, com o cruzamento de informações sobre geomorfologia, umidade do solo, favorabilidade climática e suporte à biodiversidade. Os principais resultados indicam que mais de 80% do território da bacia foi classificado como de muito baixa prioridade para restauração, devido à predominância de áreas consolidadas, como zonas urbanas, afloramentos rochosos e corpos d'água. No entanto, foram identificados 46.750 hectares de áreas aptas à restauração florestal, sendo 36 mil hectares compostos por campos e pastagens e 10 mil hectares por áreas agrícolas. As regiões prioritárias estão concentradas nas sub-bacias dos rios Guapiaçu, Rabelo, Tatu, das Pedras, Estreito Matumbo e Duas Barras, além de áreas próximas a Sambaetiba, Subaio, Jatuíba, Cachoeira de Macacu e Guapimirim. Notavelmente, a sub-bacia do rio Guapiaçu apresentou a maior concentração de áreas de muito alta prioridade, devido à sua maior capacidade de retenção de umidade do solo, um fator determinante para o sucesso da restauração. A conclusão do estudo confirma que a análise multicritério é uma ferramenta eficiente para a definição de áreas prioritárias para restauração florestal, alinhando-se a estudos anteriores que ressaltam a importância da conectividade ecológica e do potencial regenerativo do solo. Os achados reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à recuperação de áreas degradadas e ao fortalecimento da segurança hídrica regional.

Palavras-Chave: Provisionamento hídrico; análise multicritérios; serviços ambientais.

Definition of Priority Areas for Forest Restoration in the Watershed of Guapi-Macacu/ RJ, Rio de Janeiro.

ABSTRACT

The study aimed to delineate priority areas for forest restoration in the Guapi-Macacu River basin by using integrated spatial analyses to optimize decision-making. Environmental and hydrological variables were assessed to establish a Physiographic Potential for Water Supply Index and an Environmental Potential for Forest Restoration Index, enabling the classification of the territory according to its restoration priority level. The methodology included land use and land cover mapping at a 1:25,000 scale and the application of a multicriteria approach based on the integration of geotechnologies and spatial modeling. Remote sensing data, hydrological and physiographic variables, and the identification of forest fragments were used to evaluate the potential for natural regeneration. The prioritization of areas was conducted through map algebra and indicator analysis, integrating information on geomorphology, soil moisture, climate favorability, and biodiversity support.

The main results indicate that over 80% of the basin's territory was classified as very low priority for restoration, due to the predominance of consolidated areas such as urban zones, rocky outcrops, and water bodies. However, 46,750 hectares of land were identified as suitable for forest restoration, including 36,000 hectares of grasslands and pastures and 10,000

hectares of agricultural areas. The priority regions are mainly concentrated in the sub-basins of the Guapiaçu, Rabelo, Tatu, das Pedras, Estreito Matumbo, and Duas Barras rivers, as well as in areas near Sambaetiba, Subaio, Jatuíba, Cachoeira de Macacu, and Guapimirim. Notably, the Guapiaçu sub-basin exhibited the highest concentration of very high-priority areas due to its greater soil moisture retention capacity, a key factor for restoration success. The study's findings confirm that multicriteria analysis is an effective tool for defining priority areas for forest restoration, aligning with previous studies that highlight the importance of ecological connectivity and soil regenerative potential. The results emphasize the need for public policies focused on restoring degraded areas and strengthening regional water security.

Keywords: Water supply; multi-criteria analysis; ambiental services.

Introdução

A conservação e restauração da cobertura vegetal são fundamentais para a manutenção e melhoria da oferta de serviços ambientais de regulação, de cultura, provisionamento e de suporte prestados pelas florestas, sendo esperado que a demanda por tais serviços, a exemplo do sequestro de carbono e da regulação da água, aumente devido ao crescimento da população global e à elevação dos padrões de vida (FAO, 2010; Miura et al., 2015; TEEB, 2010).

Os baixos índices pluviométricos observados no Sudeste do Brasil durante os verões de 2014 e 2015 colocaram em risco o atendimento ao abastecimento de água às populações em toda essa porção do território nacional (Dobrovolski; Rattis, 2015). Todavia, esse cenário e suas consequências não são apenas efeito de eventos de extremos climáticos de seca, mas resultam da redução da cobertura florestal das bacias hidrográficas e a consequente diminuição dos serviços ecossistêmicos de provisionamento hídrico (Ferraz et al., 2014; Postel; Thompson, 2005).

Considerando o percentual de cobertura florestal e o estágio sucessional dos fragmentos florestais nas áreas de drenagem a montante dos pontos de captação de água do estado do Rio de Janeiro, constata-se a ausência de florestas em bom estado de conservação, assim como outras formas de vegetação nas Áreas de Preservação Permanente (APP) e nas Faixas Marginais de Proteção (FMP). Além disso, as APP's de muitos rios importantes do estado, bem como as áreas das FMP dos reservatórios apresentam menos de 10% de seus territórios florestados. Essa realidade conduz à demanda de plantio de milhões de árvores como medida de restauração florestal (Do Ambiente, 2014).

A intervenção antrópica em paisagens de marcada diversidade climática e geomorfológica gera modificações de comportamento hidrológico e expressa uma heterogênea disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. Muitas vezes essas alterações são causadas pela redução da cobertura florestal, que é essencial para a recarga dos corpos d'água,

causando também, frequentemente, problemas de erosão e degradação dos solos.

Além da baixa disponibilidade de água, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) abriga os maiores contingentes populacionais e o parque industrial do estado e, consequentemente, enfrenta problemas decorrentes dessa intensa ocupação. Observa-se elevada carga orgânica nos efluentes, remoção da cobertura vegetal das faixas marginais de proteção dos rios, impermeabilização do solo, ocupações irregulares, erosão dos solos e assoreamento.

A bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, situada na região hidrográfica da Baía de Guanabara é dotada de grande relevância no que tange à segurança hídrica da RMRJ, apresentando conflitos ambientais relacionados à água em seu território, e encontra-se em uma situação de elevado comprometimento da disponibilidade hídrica. Além disso, a área ainda suporta outros usos menos formais e restritivos, como irrigação e piscicultura.

A bacia do rio Guapi-Macacu suporta uma das principais Áreas de Interesse para Proteção de Mananciais do Estado do Rio de Janeiro (AIPMs). Trata-se do Sistema de Abastecimento Imunana – Laranjal, que atende mais de 1.700.000 habitantes e, segundo informações do Atlas dos Mananciais de Abastecimento Público do Estado do Rio de Janeiro, encontra-se em estado de muito alto comprometimento da disponibilidade hídrica (INEA, 2018). Abriga, ainda, outros usos menos formais e restritivos, como irrigação e piscicultura.

Em função de sua grande diversidade fisiográfica, e também em decorrência de sua grande importância no suprimento de água para grande parte dos municípios da porção leste da baía de Guanabara, a bacia do rio Guapi-Macacu é protegida por uma vasta rede de unidades de conservação de uso sustentável e de proteção integral que fazem parte do Mosaico do Corredor Central Fluminense. Merecem destaque o Parque Estadual dos Três Picos e a Área de Proteção Ambiental de Macaé de Cima.

As ações de restauração florestal dirigidas em bacias hidrográficas se apresentam como sendo uma necessidade e uma das opções mais viáveis

para estabelecer provisionamento hídrico. Todavia, apresentam custos elevados e vultosos esforços para a garantia de sua eficácia e cumprimento de suas etapas, as quais abarcam a execução dos plantios, o estabelecimento de práticas de manejo e controle, a mobilização e envolvimento dos proprietários agrícolas para o repasse de manutenção, e o monitoramento de sua efetividade.

O sucesso do reflorestamento para promoção de resposta hidrológica positiva das bacias hidrográficas é influenciado pelas características e relações fisiográficas, socioambientais, hidrológicas e ecossistêmicas inerentes e estabelecidas em sua área de contribuição.

Diversos métodos de análise espacial e hidrológica têm sido desenvolvidos para definição de áreas prioritárias de restauração florestal (Vettorazzi, 2006; Magalhães Júnior., 2007; Rodrigues et al., 2009; Banks-leite et al., 2014; Crouzeilles et al., 2016; Da Silva Ximenes et al., 2024; Muchailh et al., 2024) assim como para simulação e exploração de cenários hidrológicos preditivos às alterações nos usos e coberturas do solo (Araújo, 2024; Postel & Thompson, 2005; Neitsch et al., 2011; Bonumá et al., 2015; Filoso et al., 2017; Nogueira et al., 2024).

A restauração florestal desempenha um papel fundamental na recuperação de serviços ecossistêmicos, como a regulação do ciclo hidrológico, a conservação da biodiversidade e a mitigação das mudanças climáticas. No entanto, a definição de áreas prioritárias para essas ações exige abordagens metodológicas robustas, que combinem variáveis ambientais, socioeconômicas e institucionais. Nos últimos anos, estudos têm demonstrado a eficácia de ferramentas como análises multicritério, geotecnologias e modelagem espacial para otimizar a alocação de esforços na restauração florestal (da Silva Ximenes et al., 2024).

Asevedo et al. (2022) exploraram o uso de análises multicritério para identificar áreas prioritárias na bacia do rio Guapi-Macacu, destacando a importância do Cadastro Ambiental Rural (CAR) para a seleção de imóveis com passivos ambientais. O estudo identificou 583 hectares de Áreas de Preservação Permanente (APPs) degradadas e 274 hectares de reservas legais sem vegetação, evidenciando a necessidade de restauração para melhorar a conectividade dos fragmentos florestais e a proteção dos mananciais hídricos.

No estado do Paraná, Muchailh et al. (2024) aprimoraram o mapeamento de áreas estratégicas para conservação e restauração da

biodiversidade, utilizando imagens de satélite de alta resolução e séries temporais do MapBiomass. A metodologia resultou na ampliação das áreas estratégicas para conservação de 11,95% para 25,45% do território estadual, evidenciando a eficácia da abordagem na definição de zonas prioritárias para recuperação florestal e na otimização da aplicação de recursos ambientais.

Outro estudo relevante foi conduzido por dos Santos (2024), que analisou a tomada de decisão na definição de áreas prioritárias para implementação de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). A pesquisa indicou que a abordagem multicriterial, aliada a dados geoespaciais, é fundamental para maximizar a efetividade desses programas, otimizando investimentos e garantindo a recuperação das funções ecossistêmicas.

A modelagem de cenários futuros também tem se mostrado uma ferramenta promissora para a restauração florestal. Fonseca (2024) investigou a dinâmica do uso da terra no entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro/MG, utilizando modelagens determinísticas e probabilísticas para prever a evolução da cobertura vegetal até 2050. Os resultados indicaram que a restauração pode ser mais economicamente viável do que a manutenção de pastagens, reforçando a necessidade de políticas públicas voltadas à recuperação ambiental.

No contexto das bacias hidrográficas, da Silva Ximenes et al. (2024) realizaram uma revisão metodológica sobre a definição de áreas prioritárias para reflorestamento, destacando a importância da abordagem multicriterial e da integração de dados do CAR em ambientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A pesquisa demonstrou que essas estratégias são essenciais para embasar políticas de conservação e restaurar a funcionalidade ecológica das paisagens degradadas.

Nessa perspectiva, a hipótese de que a definição de áreas prioritárias para restauração florestal conduzida através de análises multicritérios é fundamental para o direcionamento de atividades de restauração, conforme referenciado em literatura especializada (Da Silva Ximenes et al., 2024; Muchailh et al., 2024).

Dessa forma, O objetivo geral deste trabalho é de delimitar áreas prioritárias para restauração florestal para proteção dos mananciais de abastecimento da bacia hidrográfica do rio Guapi Macacu/RJ. A consecução do objetivo geral está integrado ao alcance de objetivos específicos, a saber: Analisar os Usos e Coberturas do Solo da Bacia do Rio Guapi-Macacu para o ano de 2019; Elaborar indicadores para definir áreas de restauração florestal a partir de questões associadas

à potencialidade ambiental de restauração florestal (maiores chances de desenvolvimento e alcance do sucesso das intervenções), e potencialidade fisiográfica de oferta hídrica (maior propensão à disponibilidade e armazenamento de água no solo).

Material e métodos

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu (RJ) situa-se na porção oriental da Região Metropolitana do Rio de Janeiro e, com área de cerca de 1.260 km², possui destacada expressão em área de drenagem da Baía de Guanabara, correspondendo a aproximadamente 26,21% de sua área total (Figura 1). É resultante da união artificial das bacias dos rios Macacu e Guapiaçu, que ocorreu a partir da construção do canal Imunana, com o desvio do curso natural do rio Macacu, que foi artificialmente unido ao Guapimirim (Benavides et al., 2009). Essa intervenção na dinâmica natural da rede hidrográfica teve o objetivo de drenar as áreas da baixada (Ferreira, 2012) e formar a Represa de Imunana-Laranjal, responsável pelo abastecimento de mais de 1.700.000 pessoas dos municípios de São Gonçalo, Niterói e Itaboraí (Benavides et al., 2009).

Situada entre as latitudes médias de 22° 24' e 22° 57' Sul e longitudes médias 42° 33' e 43° 19' Oeste, a bacia abrange parte dos municípios de Cachoeira de Macacu (90% da área municipal pertencem à referida bacia), Guapimirim (aproximadamente 95%), e Itaboraí (12%). É limitada ao leste pelas serras da Botija e de Monte Azul, ao sul pelas serras do Sambê e dos Garcias, ao norte e noroeste pela serra dos Órgãos e a nordeste pela serra de Macaé de Cima.

O rio Macacu, principal curso d'água da região em questão, tem nascentes na Serra dos Órgãos, na área do Parque Estadual de Três Picos, a cerca de 1.700 m de altitude e percorre aproximadamente 74 km até a sua junção com o rio Guapimirim. O rio Guapiaçu possui nascentes a cerca de 1.200 m de altitude, também na Serra dos Órgãos, no município de Cachoeiras de Macacu. Flui paralelamente ao rio Macacu, até se unirem no início do canal Imunana. Já o rio Guapimirim tem suas nascentes na altitude de 2.000 m e área de captação quase inteiramente situada no município de Guapimirim. O canal recebe as águas do Macacu e do Guapiaçu ao final do canal de Imunana e seu trecho final passou a ser chamado de Guapi-Macacu. Após essa junção, suas águas atravessam a área do manguezal Guapimirim, desaguando na baía de Guanabara (Ferreira, 2012).

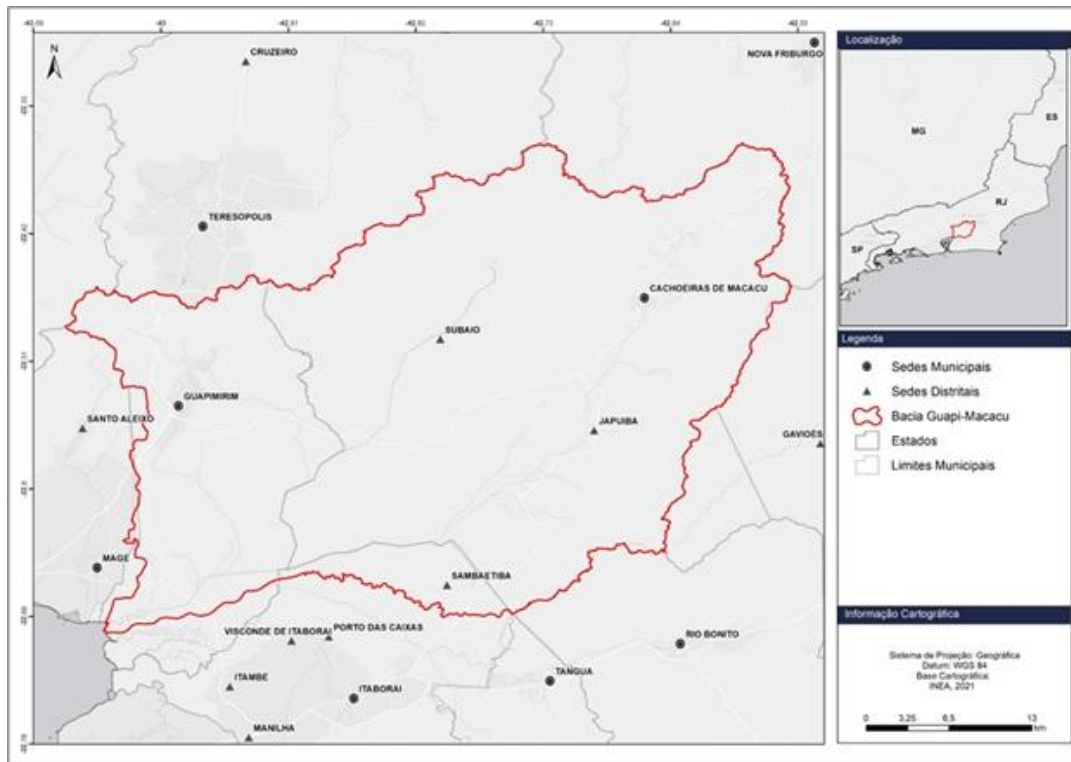


Figura 1. Bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro.

Há, na área, uma grande diversidade fisiográfica: uma profusão de unidades de paisagem, que variam desde os mangues e brejos das planícies flúvio-marinhas alagáveis até as floresta atlântica altimontana e os campos de altitude que revestem os cimos e cumes das escarpas e altos platôs (Dantas et al., 2012). Também o relevo pode ser compartimentado em diferentes unidades, que variam desde áreas planas, no nível do mar, até regiões serranas com declividades acentuadas e altitudes que ultrapassam os 2.000 m. Ocorrem, na bacia, as Escarpas da Serra do Mar, as Bacias Sedimentares Cenozóicas compostas por Planícies Flúvio-Marinhas e Tabuleiros de Bacias Eo-Cenozóicas.

Em um primeiro segmento, os altos cursos dos canais drenam a encosta da Serra do Mar com leitos em corredeiras e cachoeiras, tendo suas margens cobertas por Mata Atlântica. Em um segundo segmento, curto, os canais percorrem uma área de transição entre as escarpas e as planícies, com formação menos acidentadas, colinas com formas arredondadas e maciços com altitudes inferiores a 1.000 m. Neste, os canais apresentam-se margeados por matas ciliares. Em um terceiro segmento, no baixo curso, a rede de drenagem percorre áreas de baixada, com terrenos planos e desníveis mínimos, facilmente inundáveis e sujeitos às influências da maré. A vegetação do segmento inferior é composta por pequenos arbustos, pastos e mangues (Ferreira, 2012).

Juntamente com a bacia hidrográfica do rio Caceribu, a bacia do rio Guapi-Macacu tem menor densidade demográfica e áreas de mata ainda preservadas em comparação com as vizinhas, o que faz com que a água proveniente dela seja, ainda, de boa qualidade. Contudo, a bacia não possui reservatórios para acumulação de água, e atualmente apresenta déficit de disponibilidade hídrica, sendo altamente pressionada por fatores antrópicos como uso inadequado de terras, erosão, retificação e assoreamento dos rios e expansão urbana, que causam alterações na qualidade da água e na capacidade de armazenamento e abastecimento dessas bacias, tornando este sistema de abastecimento extremamente vulnerável e dependente do regime pluviométrico (Benavides et al., 2009).

Diante desse contexto, destaca-se a importância da restauração florestal como medida para contribuir com a segurança hídrica e reverter a degradação ambiental dos ecossistemas a ele associados.

Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo

O mapeamento dos usos e coberturas do solo da Bacia do rio Guapi-Macacu, na escala de

1:25.000, correspondeu à produção de uma informação de base fundamental para a definição de áreas prioritárias de restauração florestal.

Os procedimentos metodológicos empregados para a elaboração do mapeamento foram: Aquisição das imagens de satélite; Definição da legenda e chave de classificação; Classificação supervisionada e detecção de mudanças 2012/2019; e Edição manual.

A primeira etapa correspondeu à aquisição de imagens de média resolução Sentinel-2C 2019 e imagens de alta resolução World View e Geoeye 2018/2019. Utilizando a plataforma Google Earth Engine foi realizada a detecção de mudança para o período 2012/2019 a fim de identificar alguma diferença significativa na vegetação. Por conseguinte, passou-se para a etapa da classificação supervisionada, realizada no programa ArgGis 10.3.1, a fim de refinar e atualizar o Mapeamento realizado para ano de 2012. Para etapa da edição manual foi utilizado as imagens de alta resolução e reclassificação do refino realizado na etapa anterior. Por fim, para avaliação do Mapeamento, foi produzida tabela de Matriz de Confusão e o índice Kappa.

Os arquivos bases que foram utilizados para a realizar o mapeamento da Bacia do Rio Guapi-Macacu foram as imagens do satélite Sentinel-2C, e dos satélites WorldView e Geoeye. Além disso, um mapeamento já realizado de 2012, pelo Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro (INEA) também foi utilizado como base.

A aquisição das imagens Sentinel-2C foi realizada a partir do catálogo de imagens presentes no Google Earth Engine (GEE). Nesse intuito, foi efetuado script para sua aquisição, filtrando apenas imagens dos anos desejados e com cobertura de nuvens no valor máximo de 1%. O Sentinel-2C possui 13 bandas espectrais, mas nesse trabalho foram utilizadas apenas as bandas do visível (vermelho, verde e azul) e a banda do infravermelho, deve ao fato dessas bandas possuírem resolução espacial de 10 m.

As imagens de alta resolução World View e Geoeye foram cedidas pelo INEA, e reamostradas para 1 metro de resolução espacial, tendo sido utilizadas na fase de validação da classificação automática, como subsídio a Matriz de Confusão e Índice Kappa.

A definição da legenda teve como base análises visuais e o mapeamento realizado em 2012. Foram estabelecidas as classes de uso e cobertura da terra, utilizando como referência o Manual de Uso e Cobertura da Terra (IBGE, 2013). As classes estabelecidas foram:

- Naturais: Vegetação alta/média; Vegetação inicial; Mangue; Afloramento rochoso; Corpos d'água; Comunidade Relíquia.
- Áreas antrópicas - Agrícolas: Agricultura; Campo Pastagem.
- Áreas antrópicas – Não agrícolas: Urbano; Edificações Esparsas; Áreas antrópicas indiscriminadas; Solo exposto.

Foi estabelecida uma chave de interpretação das classes de uso e cobertura definidas anteriormente, tendo como base a imagem do mapeamento de 2012 com o satélite Word View 2, 3 e Geoeye 2018 / 2019 e imagens do satélite Sentinel-2C de 2019.

A classificação supervisionada foi realizada com base no mapeamento 2012 realizado por INEA, 2013/2014 e imagens Sentinel - 2C, nas bandas espectrais do visível e infravermelho próximo. Após esse procedimento foram coletadas amostras através do método booleano (Sim, quando pertence à classe em análise e Não, quando não pertence a classe) das classes já estabelecidas como as que fazem a maior parte do uso. A classificação seguiu as seguintes etapas:

- Recorte da imagem Sentinel do uso esperado (a partir do mapeamento 2012);
- Recolhimento de amostras utilizando a ferramenta Training Sample Manager;
- Após o recolhimento das amostras ativa-se a ferramenta de classificação supervisionada interativa (Interactive Supervised Classification);

A Figura 2 apresenta o processo de refinamento do mapeamento de 2019. Os polígonos verdes correspondem aos limites de VGMA do mapeamento de 2012, os polígonos brancos correspondem, ao refino, ou a mudanças ocorridas, resultando no mapeamento 2019 refinado, ou seja, com mais feições não VGMA identificadas.

A primeira etapa para iniciar a detecção de mudança através de google Earth Engine é definindo as imagens que serão utilizadas. Para isso utiliza-se filtros quanto aos fatores cobertura de nuvem, as datas, qual satélite e a localização da área de estudo. As datas definidas foram 12-07-2011 e 02-09-2018.

A porcentagem definida de cobertura de nuvem foi menor que 5%. Os satélites utilizados foram USGS Landsat 5 TM Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance, para 2012, e USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance, para 2018. A localização é o limite da bacia do Guapi-Macacu.



Figura 2. Polígonos de VGMA (2012 / 2019)

Na segunda parte é realizada a normalização da imagem. Para isso define-se uma imagem vazia. As bandas selecionadas para o processo são as do infravermelho próximo e da banda do vermelho. Os pontos pseudo invariantes (Pifs) são coletados, totalizando 100 pontos.

A partir desses pontos foram geradas efetuadas estatísticas com os valores das médias da banda de cada ponto coletado. Nesse sentido, foi gerado um gráfico de dispersão, na qual se calcula a expressão da regressão linear, com a linha de tendência.

Para dar prosseguimento ao script de mudança foi necessário realizar o cálculo do NDVI (acrônimo da expressão inglesa Normalized Difference Vegetation Index que pode ser traduzido para Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), e o índice de cobertura vegetal de pastagem (CVP). O cálculo do NDVI foi realizado com as bandas do infravermelho e do vermelho, para as duas datas em análise. Após esse procedimento foi calculado um novo índice de normalização, em que são utilizadas as bandas do vermelho e do azul para gerar a máscara de sombra.

A Edição manual constituiu-se da realização de ajustes manuais, com base nas imagens de alta resolução obtidas junto ao Projeto Olho no Verde (SEA/ INEA).

Para a matriz de confusão foram gerados 629 pontos aleatórios para toda área. A avaliação dos pontos gerados foi feita através de visualização e interpretação do próprio pesquisador. A escala de visualização foi a mesma para a classificação geral, sendo de 1:25.000. Por conseguinte, foi realizada a matriz de confusão com todos os erros e acertos da validação, com o intuito de se identificar os erros do produtor e do consumidor, a exatidão global e gerar por fim o índice Kappa.

Definição de Áreas de Restauração Florestal

A definição de áreas prioritárias para restauração florestal demanda o conhecimento de grande número de variáveis, cujas combinações

podem produzir diferentes alternativas de ação e planejamento. Dentro desse contexto, ferramentas de análise espaço-temporais que permitam reunir características bastante diversas, atribuir pesos e valores a elas, dando prioridades às diferentes opções, facilitam a tomada de decisão (Francisco et al., 2008).

A abordagem proposta nessa pesquisa partiu da aquisição, coleta e tratamento de bases de dados sobre elementos fisiográficos e ambientais da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, a fim de produzir indicadores que auxiliem a tomada de decisão acerca da delimitação de áreas prioritárias para restauração florestal. Cada indicador foi elaborado segundo procedimentos de análise específicos, tendo sido definidos critérios de classificação quantitativa associada à qualidade de seus resultados para o alcance dos objetivos pretendidos na análise em questão. Nesse sentido, os indicadores possuem escalas de classificação qualitativamente ordenadas, facilitando a tomada de decisão. A produção dos indicadores está associada à identificação das áreas de maior prioridade de restauração florestal para provisionamento hídrico, e denotam as limitações e potencialidades expressas pelas seguintes informações: Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica; e Potencialidade Ambiental para Restauração Florestal.

Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica

A Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica busca expressar, a partir da constituição dos fatores de relevo, clima, solos e hidrogeologia dos ambientes analisados, as áreas detentoras de condição edafoclimática mais favorável para provisionamento hídrico. Esse índice foi elaborado a partir de duas informações base: Geomorfologia e Umidade do Solo; e Favorabilidade Climática.

O indicador Geomorfológico de Umidade do Solo indica, a partir da constituição de parâmetros geomorfológicos dos ambientes analisados, áreas detentoras de condição edafoclimática mais capacitada para provisionar água através da manutenção da cobertura florestal, proporcionando o desenvolvimento e perpetuação das espécies vegetais, assim como a ampliação e regularização das vazões fluviais afluentes aos mananciais de abastecimento d'água.

Nesse sentido esse indicador foi utilizado no presente projeto com o objetivo de estabelecer critérios para a compartimentação das bacias hidrográficas associados à dinâmica hidrológica, indicando áreas com maior e menor potencial para armazenamento das águas pluviais, concentração dos fluxos de escoamento superficial e,

consequentemente, de armazenamento de água no solo.

A Figura 3 apresenta o fluxograma metodológico de elaboração do indicador de Geomorfologia e Umidade do Solo. Os atributos topográficos foram obtidos a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) elaborado e cedido pelo INEA, em escala de 1:10.000.

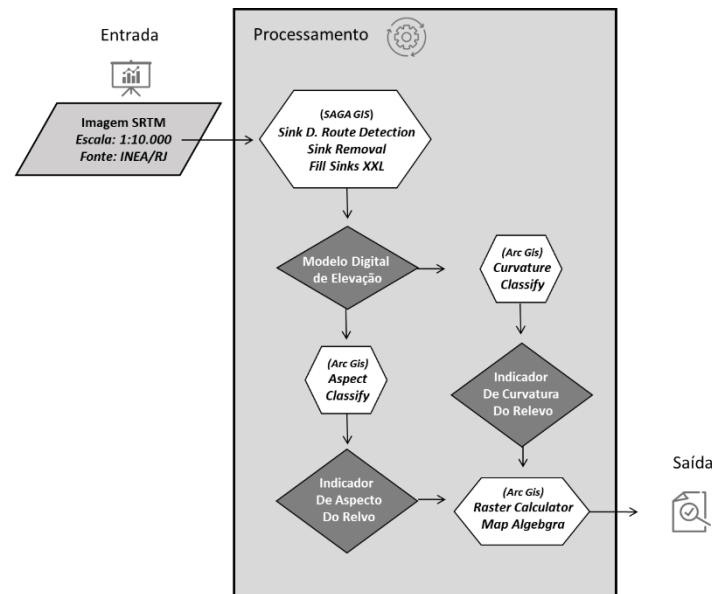


Figura 3. Fluxograma metodológico: Geomorfologia e Umidade do Solo

Para ser utilizado na extração de informações morfométricas o Modelo Digital de Elevação (MDE) passou por uma etapa de pré-processamento, no intuito de corrigir ruídos e erros. Neste sentido, o software SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) foi adotado, por apresentar uma base ampla com os principais algoritmos consolidados para esses procedimentos.

O emprego do MDE possibilitou a geração dos Índice de Curvatura do Relevo e o Indicador de Aspecto do Relevo.

O Índice de Curvatura do Relevo levou ao mapeamento das áreas das vertentes com inclinação côncava, convexa e retilínea, delineando assim áreas com maior propensão ao armazenamento ou escoamento superficial das águas pluviais. A informação cartográfica elaborada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica foi reclassificada para uma escala quantitativa de 0 até 1, em que os valores maiores representam feições do relevo com maior concavidade, e portanto mais aptas à manter maior teor de umidade no solo, e os valores menores denotam áreas convexas, estando assim mais predispostas à promover escoamento superficial das águas pluviais.

O Aspecto do Relevo é um indicador que permite mapear a orientação das vertentes e consequentemente de seus níveis de radiação solar, influenciando, assim, as taxas de evapotranspiração e consequentemente os teores de umidade do solo das paisagens-alvo. As áreas mapeadas foram classificadas segundo sua inclinação e a menor exposição à radiação solar. Nesse sentido, as áreas orientadas para Sudeste e Sul, receberam as maiores notas, pois recebem, respectivamente sol da manhã e menor radiação global anual, em detrimento das áreas situadas em sentido Noroeste e Norte.

A informação cartográfica elaborada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica foi reclassifica para uma escala quantitativa de 0 até 1, em que os valores maiores representam feições do relevo com maior concavidade, e portanto mais aptas à manter maior teor de umidade no solo, e os valores menores denotam áreas convexas, estando assim mais predispostas à promover escoamento superficial das águas pluviais.

Por fim foi efetuada uma álgebra de mapas, a qual, simplificadamente, se constitui no tratamento e cruzamento das variáveis temáticas dispostas em planos de informação, gerando mapas a partir dos temas dispostos. O procedimento foi efetuado com auxílio do software ArcGis 10.3.1, se utilizando da ferramenta Raster Calculator, e atribuindo pesos iguais para as variáveis analisadas.

O mapa final foi qualificado em escala de maior ou menor prioridade para restauração florestal, sendo os valores dos campos matriciais do mapa elaborado qualificados segundo uma divisão estatística de quartil de frequência, estando o mapeamento dividido em áreas que se aproxima de uma divisão igualitária entre os valores finais encontrados.

A Figura 4 apresenta a metodologia para produção do indicador de Favorabilidade Climática, o qual indica a condição de prover águas pluviais de forma regular e expressiva nas paisagens-alvo.

O indicador de Favorabilidade Climática foi realizado a partir da cruzamento de informações espaciais de indicadores de extremos, a saber: Dias secos consecutivos (CDD), correspondente ao número máximo de dias no ano consecutivos com precipitação abaixo de 1 mm; e Precipitação anual total média dos dias úmidos (PRCPTOT). Seu intuito é o de indicar as áreas de maior condição para indica a condição local de prover águas pluviais de forma regular e expressiva nas paisagens-alvo de restauração florestal. Nesse sentido, utilizaram-se dados pluviométricos diários

provenientes da Agência Nacional das Águas (ANA).

A fase inicial do processamento consistiu no tratamento dos dados das estações pluviométricas, de modo a analisar a sua consistência, investigar a existência ou não de tendência estatisticamente significativa de aumento ou redução na série de dados. Foram feitos análises dos dados das estações e comparações com estações vizinhas para determinar se os valores da precipitação estão corretos. Nesse sentido, ressalta-se também o uso do RCLimDex, que também realiza avaliação da homogeneização dos dados e no cálculo dos índices, armazenando toas as informações em arquivos de planilha eletrônica, tendências (linear e não linear) de longo tempo dos índices e também a estatística p (nível de significância estatística).

Em seguida foi necessário se proceder à metodologia de interpolação de dados para especializar as informações, com a metodologia do Inverso da Distância Ponderada (IDW). O software utilizado neste sentido foi o ArcGIS 10.3.1, o qual executa os métodos de interpolação referidos através da extensão 3D Analyst, que gera campos numéricos a partir de dados pontuais (Interpolação a Raster).

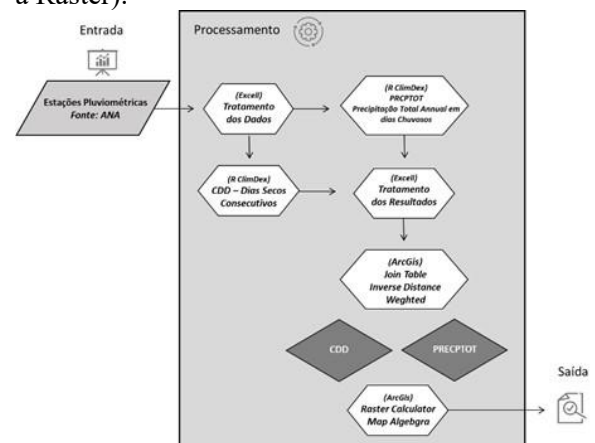


Figura 4. Fluxograma metodológico: Favorabilidade Climática

Os indicadores foram produzidos a partir da normalização dos valores encontrados em cada mapa para uma escala de 0 – 1, indicando as áreas prioritárias para restauração florestal. Nesse sentido, em relação à precipitação média anual, as regiões hidrográficas ocupadas por faixas de maior volume de chuva anual, receberam notas maiores, enquanto que para o índice de seca, adotou-se uma

relação inversamente proporcional entre a prioridade para a restauração e a disposição de áreas com maior número de dias do ano sem chuva. Uma álgebra de mapas foi por fim efetuada para produzir o indicador final de Favorabilidade Climática, utilizando pesos iguais para as duas informações cartográficas empregadas. O mapa final também foi qualificado em escala de maior ou menor prioridade para restauração florestal, através da divisão estatística de quartil de frequência.

Por fim, uma nova análise multicriterial através de álgebra de mapas foi por fim efetuada para produzir o indicador final de Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica, utilizando pesos iguais para os mapas de Favorabilidade Climática e de Geomorfologia e Umidade do Solo, tendo-se ordenado o mapa final também através da divisão estatística de quartil de frequência.

Potencialidade Ambiental para Restauração Florestal

A Potencialidade Ambiental para Restauração Florestal expressa os ambientes com atributos mais favoráveis para o sucesso e desenvolvimento processos de restauração florestal. Esse índice foi elaborado a partir de duas informações base: Suporte para a Conservação da Biodiversidade; e Potencial de Regeneração Natural.

O indicador de Suporte para a Conservação da Biodiversidade indica a condição das áreas para promover a manutenção ecológica e suportar a biodiversidade das paisagens-alvo.

O indicador de Potencial de Regeneração Natural traduz a capacidade de resiliência e auto-recuperação dos fragmentos florestais para seguirem processos de sucessão ecológica e regeneração natural nas paisagens-alvo.

O mapeamento de áreas de maior Suporte para Biodiversidade teve como objetivo analisar as áreas e fragmentos florestais mais adequados para suportar e manter o fluxo gênico e a riqueza da biodiversidade, de modo a selecionar áreas em que, a partir do percentual de cobertura vegetal, dispostos nas paisagens-alvo, possa ser possível oferecer maior ganho em enriquecimento de habitats, advindo de restauração florestal, a partir do menor custo de investimento possível.

A Figura 5 apresenta o fluxograma metodológico para elaboração do indicador de Suporte para Conservação da Biodiversidade.

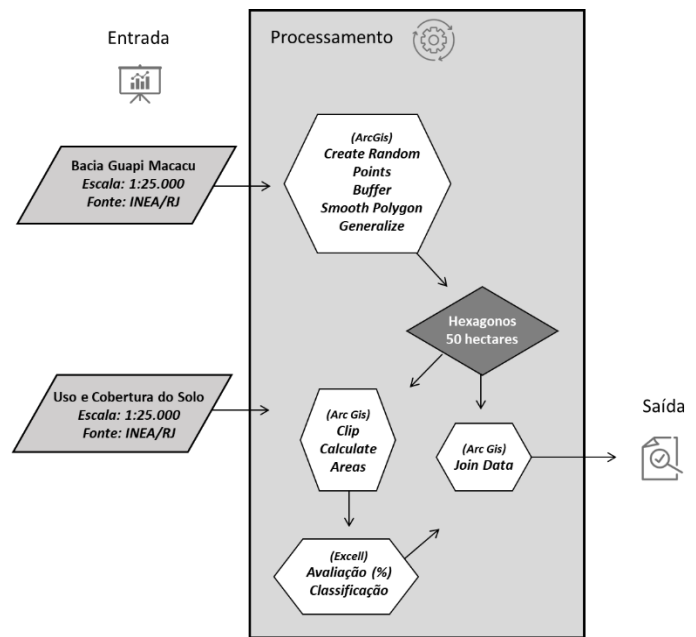


Figura 5. Fluxograma metodológico: Suporte para Conservação da Biodiversidade

Um dos dados de entrada a serem utilizados é um mapa de Uso e Cobertura do Solo da bacia do rio Guapi - Macacu na escala de 1:25.000, elaborado no âmbito desse projeto, o qual contém as seguintes classes de mapeamento: Afloramento Rochoso; Áreas Alagadas; Áreas Antrópicas Indiscriminadas; Corpos d'água; Culturas Diversas; Florestas; Manguezal; Pasto; Solo Exposto; Área Urbana de Baixa Densidade; Área Urbana de Média Densidade; e Vegetação Arbóreo-Arbustiva.

A outra informação de base é a área de drenagem da bacia, também cedida pelo INEA e disponível em escala de 1:100.000.

O primeiro passo do processo foi realizado no ambiente do software ArcGis 10.3.1, e corresponde à criação de uma malha conectada de polígonos em formato hexagonal e com área de 50 hectares perpassando todo o território da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu.

Em seguida, com o emprego dessa informação em consonância ao mapa de Uso e Cobertura do Solo, foi analisado o percentual de cobertura vegetal em unidades de paisagem, com auxílio combinado dos softwares Excell e ArcGis 10.3.

Partindo-se do arcabouço teórico metodológico delineado por Banks-Leite (2014), a classe com 20 a 40% de cobertura vegetal foi considerada prioritárias em relação às de 40 a 50%. Áreas com percentuais de cobertura vegetal acima de 50% foram desconsideradas por já possuírem percentual adequado para a integridade das comunidades, e aquelas abaixo de 10 % devido ao

maior custo para se alcançar um percentual de cobertura mais favorável. Essa escala de qualificação dos valores encontrados foi normalizada de 0 -1 para ordenar os valores segundo níveis de prioridade.

O mapeamento de áreas prioritárias para restauração florestal associadas ao Potencial de Regeneração Natural buscou identificar áreas contíguas aos fragmentos florestais passíveis de restauração florestal a partir de condução por regeneração natural, tendo sido mapeadas faixas de distâncias a esses fragmentos de até 300 metros de distância.

Nesse sentido foram elencadas, com auxílio do software ArcGIS 10.3.1, as áreas do entorno de fragmentos florestais prioritárias para restauração florestal, seguindo a seguinte lógica: quanto menor a distância para o fragmento maior é sua prioridade, pois também é maior sua capacidade de regeneração natural, com as seguintes classes normalizadas com pesos de 0 – 1: 50 - 100 metros; 100-200 metros; 200-300 metros. Nesse intuito, foi utilizado mapa de Uso e Cobertura do Solo da Bacia do rio Guapi - Macacu na escala de 1:25.000, elaborado no âmbito desse projeto, referente ao ano de 2019.

A Figura 6 apresenta a o fluxograma metodológico para produzir o indicador de Potencial de Regeneração Natural. A análise foi efetuada com auxílio do software ArcGIS 10.3.1.

Por fim, uma álgebra de mapas foi efetuada para se produzir o índice de Potencialidade Ambiental para Restauração Florestal.

Áreas de Restauração Florestal

A etapa final para a definição de áreas de restauração florestal foi efetuada a partir de realização de uma álgebra de mapas com duas principais informações cartográficas elaboradas no âmbito desse projeto, sendo que a análise multicritério desenvolvida nessa etapa utilizou pesos iguais para as duas camadas em análise.

Em seguida, utilizando-se o mapeamento de uso e cobertura do solo para a bacia do rio Guapi-Macacu de 2019, as classes de mapeamento associadas à usos antrópicos e tipologias vegetais consolidadas no território foram selecionadas e exportadas para serem empregadas como usos e coberturas do solo não elegíveis para restauração florestal. Essa feição foi utilizada como uma “máscara” para apagar todas as áreas a ela sobrepostas. O produto desse conjunto de análises espaciais foi então classificado em três níveis de prioridade, através de quartis de frequência.

A Figura 7 apresenta a metodologia para a definição de áreas de restauração florestal

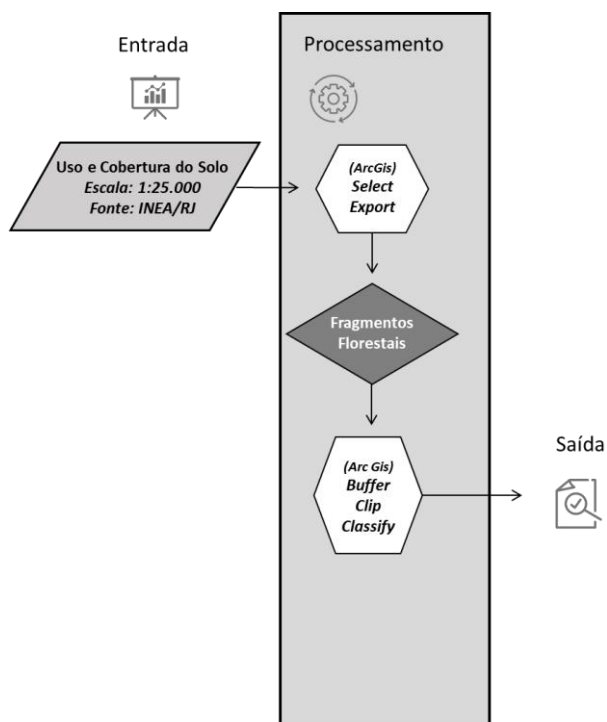


Figura 6. Fluxograma metodológico: Regeneração Natural

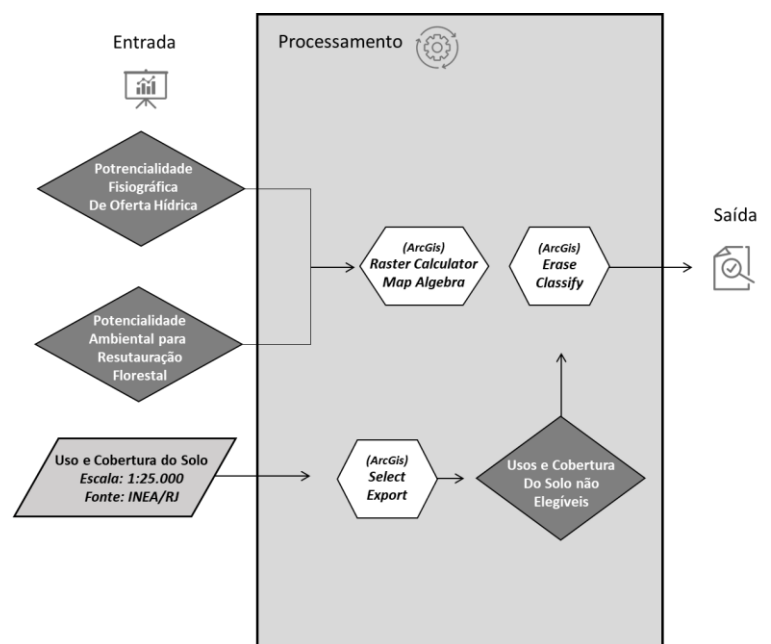


Figura 7. Fluxograma metodológico: Áreas de Restauração Florestal

Resultados e Discussão

Maapeamento de Uso e Cobertura do Solo

O mapa de uso e cobertura do solo para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu do ano de 2019 pode ser visto na Figura 8.

da Mata Atlântica Central Fluminense, como o Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Parque Estadual dos Três Picos, Área de Proteção Ambiental de Guapimirim e Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Macacu.

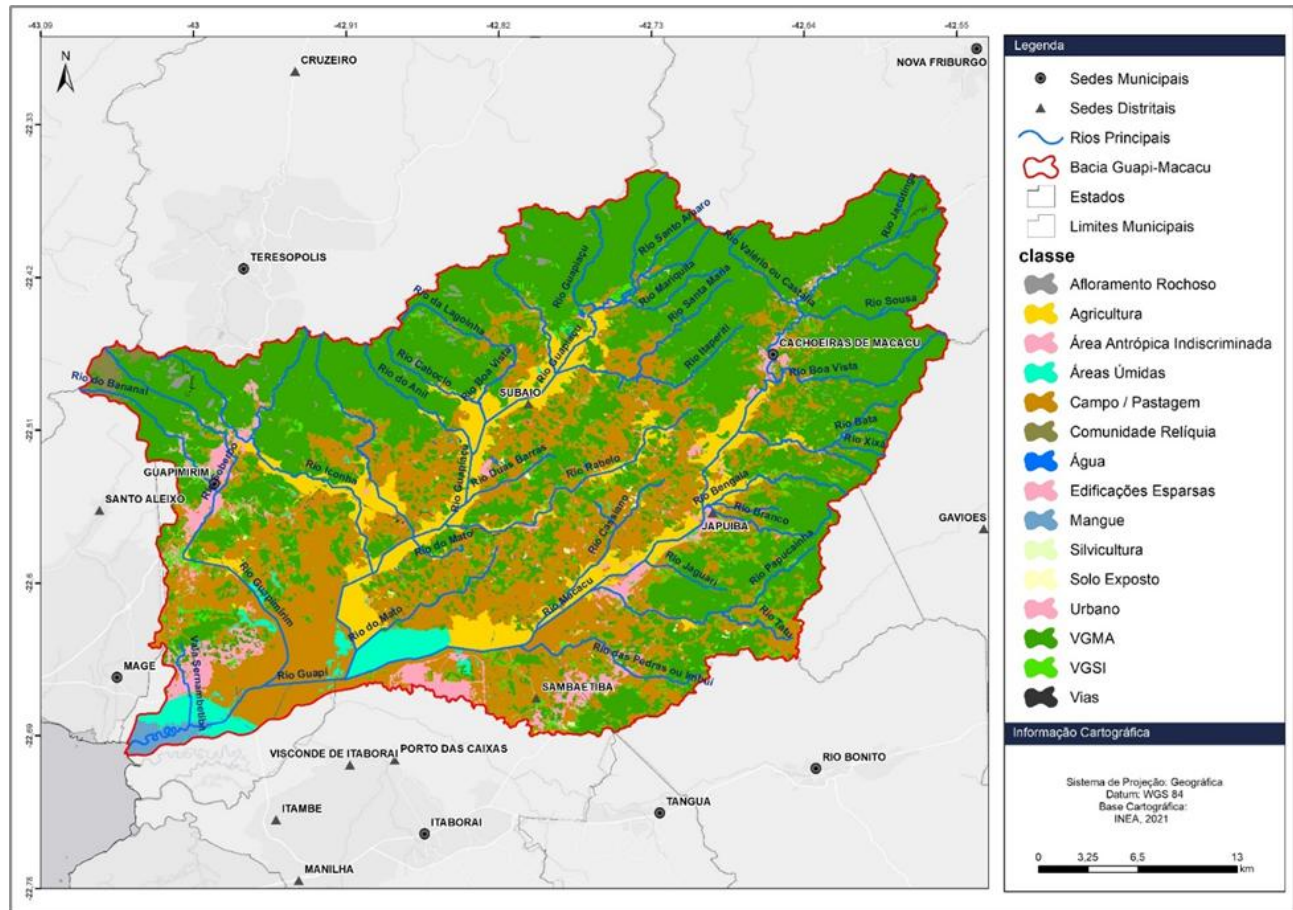


Figura 8. Uso e cobertura do solo para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro.

Os resultados demonstram que a Bacia do Guapi-Macacu possui duas grandes classes principais de uso e cobertura do solo, são elas a Vegetação em estágio médio avançado e campo/pastagem, juntas somam 78,92% da área total da bacia. Além dessas tipologias, outras classes merecem destaque, a saber: Vegetação em estágio inicial (5.880 ha); área urbana (3.058 ha), e agricultura (10.105 ha), que somadas possuem percentual de área total de 15,09%.

O mapeamento efetuado demonstra que a tipologia de Vegetação Secundária em Estágio Médio / Avançado é proeminente e ocupa parcelas significativas das áreas de cabeceiras de drenagem. A marcada presença dos fragmentos florestais nessas regiões se associa à expressiva presença de Unidades de Conservação que compõe o Mosaico

Os fragmentos florestais de Vegetação Secundária em Estágio Médio / Avançado ocupam ainda parte significativa de seus interflúvios e zonas de médio curso da bacia do Guapi-Macacu, com destaque para os Rios Guapiaçu, Macacu, Guapimirim do Anil, Paraíso Orandi-Açu, Duas Barras, do Mato, Iconha. Nos interstícios entre essa tipologia vegetal e as áreas de Campo / Pastagem, se apresentam áreas de Vegetação Secundária em Estágio Inicial, ocupando 5.880 hectares.

Bordejando os fragmentos florestais de Vegetação Secundária em Estágio Médio / Avançado, no médio curso da bacia, situam-se áreas das tipologias de Campo/ Pastagem que se estendem em um continuum ao longo das paisagens dos vales fluviais em direção às faixas de proteção marginal dos principais rios da região, onde se evidencia também larga distribuição de

áreas de cultivos agrícolas, os quais, com um total de 10 mil hectares, situam-se ao longo das planícies fluviais da rede de drenagem.

Os afloramentos rochosos ocupam mais de 450 hectares ao longo da bacia, e estão situados ao longo das áreas montanhosas de alto curso, principalmente nas regiões próximas à Serra dos Órgãos, na fronteira com o município de Teresópolis.

As áreas urbanas e antrópicas indiscriminadas estão principalmente localizadas ao longo das sedes municipais e distritais da região, representadas núcleos e zonas periféricas de Guapimirim, Cachoeira de Macacu, Magé, Subaio, Japuíba, Sambaetiba. Cabe destaque ainda a área do Complexo Petroquímico do Estado do Rio de Janeiro (Comperj), à norte de Itaboraí.

Índice de Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica

O índice de Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica foi elaborado a partir do cruzamento de dois outros índices, representados por informações cartográficas: Geomorfologia e Umidade do Solo; e Favorabilidade Climática.

Os mapas componentes do índice Geomorfológico de Umidade do Solo evidenciam uma distribuição associada às áreas de suas classes marcada por diminuta disparidade regional. Esse fato se associa ao elevado nível de resolução espacial do modelo digital de elevação empregado (10 metros) e à escala da informação produzida, que possibilita uma análise em escala de vertentes capaz de identificar compartimentos do relevo de maior ou menor condição de retenção da umidade no solo. Sendo assim, essa informação se presta mais à análise local, em contraponto à apreciação em nível de sub-bacia.

A Figura 9 apresenta o mapa do índice geomorfológico de umidade do solo, elaborado a partir do cruzamento das duas variáveis previamente apresentadas: Curvatura do Relevo, e Aspecto do Relevo

A Figura 10 apresenta o mapa do índice de Favorabilidade Climática para a bacia hidrográfica do rio Macacu

O cruzamento das informações cartográficas elaboradas dos índices de Favorabilidade Climática e Geomorfologia e Umidade do Solo levou ao desenvolvimento do índice de Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica, cujo resultado pode ser visualizado na Figura 11.

Os resultados vinculados à curvatura do relevo denotaram que a maior parte do território da bacia do rio Guapi-Macacu é composta por áreas de média predisposição a reter umidade no solo

devido à fatores geomorfológicos. Esse fator se deve à elevada distribuição de extensas áreas de planícies fluviais dos principais rios da região, a saber: Guapiaçu, Macacu, Guapimirim, Iconha e Soberbo. Essas áreas totalizam mais de 65 mil hectares e correspondem à mais de 50% da área de toda a bacia em análise, e são marcadamente presenciadas ao longo do médio e baixo curso da bacia hidrográfica, pois esses setores hidrogenéticos são mais dissecados e desenvolvidos.

Nas cabeceiras de drenagem e divisores hidrográficos, por sua vez, o relevo é composto por vales fluviais mais encaixados, de maior declividade e ondulação, conformando assim uma maior alternância e distribuição de zonas de concavidade e convexidade mais expressiva. Devido à essa característica, essas zonas apresentam larga distribuição tanto de áreas de alto e baixo nível para manter a umidade do solo.

Importante ressaltar que as áreas de muito baixa e baixa predisposição à favorecer umidade do solo a partir da curvatura do relevo apresentam, juntas, cerca de 37 % de toda a bacia do Guapi-Macacu, enquanto que às áreas com níveis classificados como alta e muito alta somam juntas aproximadamente 12 % do total. Esse fator se associa à predominância de vertentes onduladas em detrimento à vales fluviais encaixados ao longo das cabeceiras de drenagem dos rios da região.

Os resultados associados ao aspecto do relevo mostraram haver uma marcada amplitude e presença de áreas com maior taxa de insolação solar, de orientação Norte-Noroeste, e outras áreas com menores níveis de insolação, com orientação Sul-Sudeste. Esses dois grupos correspondem à uma distribuição de mais de 66 % da área total toda a bacia hidrográfica.

Esse fator se deve principalmente à rede de drenagem que apresenta muitos cursos d'água que fluem, de montante para jusante, no sentido Nordeste – Sudoeste, e que, conseqüentemente, conformam vales fluviais com vertentes majoritariamente inclinadas para os eixos Norte – Noroeste, e Sul – Sudeste, zonas essas que representam, respectivamente, as áreas denotadas como sendo de muito baixa e muito alta prioridade para restauração florestal, devido à menor ou maior tendência à favorecer a umidade no solo.

É importante ressaltar que a sub-bacia hidrográfica do rio Guapiaçu apresenta maior presença de vertentes inclinadas pra Sul – Sudeste em relação à sub-bacia do rio Macacu. Esse fator se deve principalmente ao maior controle lito estrutural que conforma mais cursos d'água de orientação Sul-Sudeste.

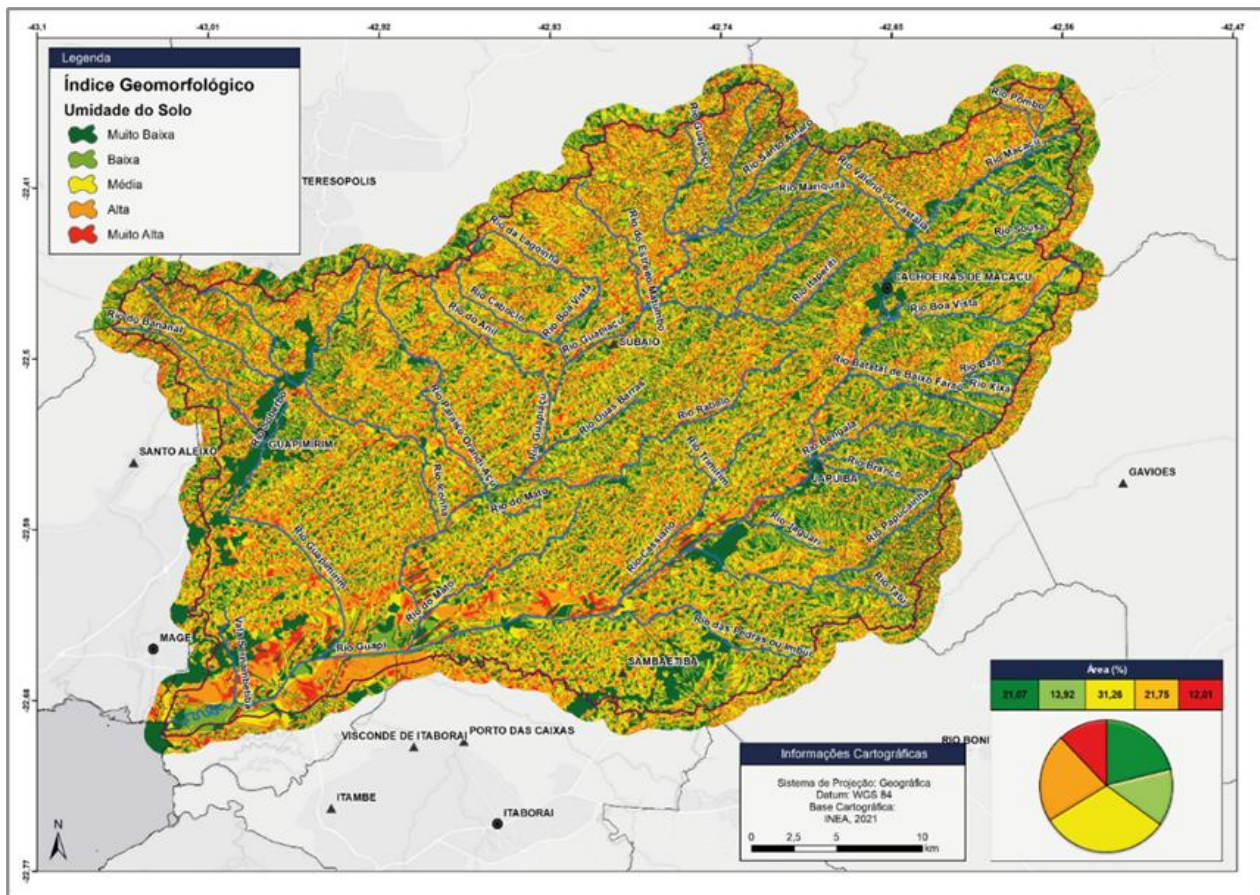


Figura 9. Mapa índice geomorfológico de umidade do solo para a bacia do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro

Nesse sentido, merecem destaque principalmente as vertentes de margem esquerda dos principais rios e seus respectivos tributários dessa sub-bacia, a saber: Rio do Bananal, rio Soberbo, rio Iconha, rio Paraíso Orandi-Açu, rio do Anil, rio Caboclo, rio da Lagoinha, rio do Estreito-Matumbo e rio Guapiaçu.

Outro fator relevante a ressaltar é que as regiões de alto curso e divisores hidrográficos apresentam também maior presença de áreas de orientação Sul-Sudeste, os quais se associam ao relevo formado nas áreas de maciços costeiros, maciços alcalinos e colinas. As áreas de cabeceira de drenagem dos rios Macacu, por exemplo, ilustram essa característica, conformando muitas áreas com nível de muito alta prioridade para restauração florestal, devido à presença de vertentes com aspecto do relevo que tende a possuir menores taxas de insolação e consequentemente evapotranspiração.

Devido à marcada influência territorial de extensas áreas de planícies fluviais dos principais rios da região, que conformam área de média

curvatura do relevo, a classe de média prioridade para restauração florestal do índice geomorfológico de umidade do solo se apresentam como sendo as de maior expressão, com quase 40 mil hectares (cerca de 30% do total da área).

A influência destacada da maior presença de vertentes inclinadas pra Sul – Sudeste na bacia do rio Guapiaçu em relação ao rio Macacu, se expressa nos resultados auferidos para o indicador de Geomorfologia e Umidade do Solo, o qual também apresenta, na bacia do rio Guapiaçu, áreas de maior prioridade.

Por fim, cabe destacar que por ter sido representada a partir de uma divisão estatística por quartis de frequência, as classes que variam entre muito baixa até muito alta prioridade estão divididas de forma equilibrada, com uma amostragem percentual associada às suas áreas relativas de menor amplitude em relação àquelas amostradas para os indicadores de curvatura do relevo e aspecto do relevo.

As informações coletadas e especializadas das estações pluviométricas levaram ao desenvolvimento das isoietas de precipitação média anual da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu. Os resultados obtidos mostram que o

volume de chuva anual na bacia varia entre 1.100 mm até 3.000 mm.

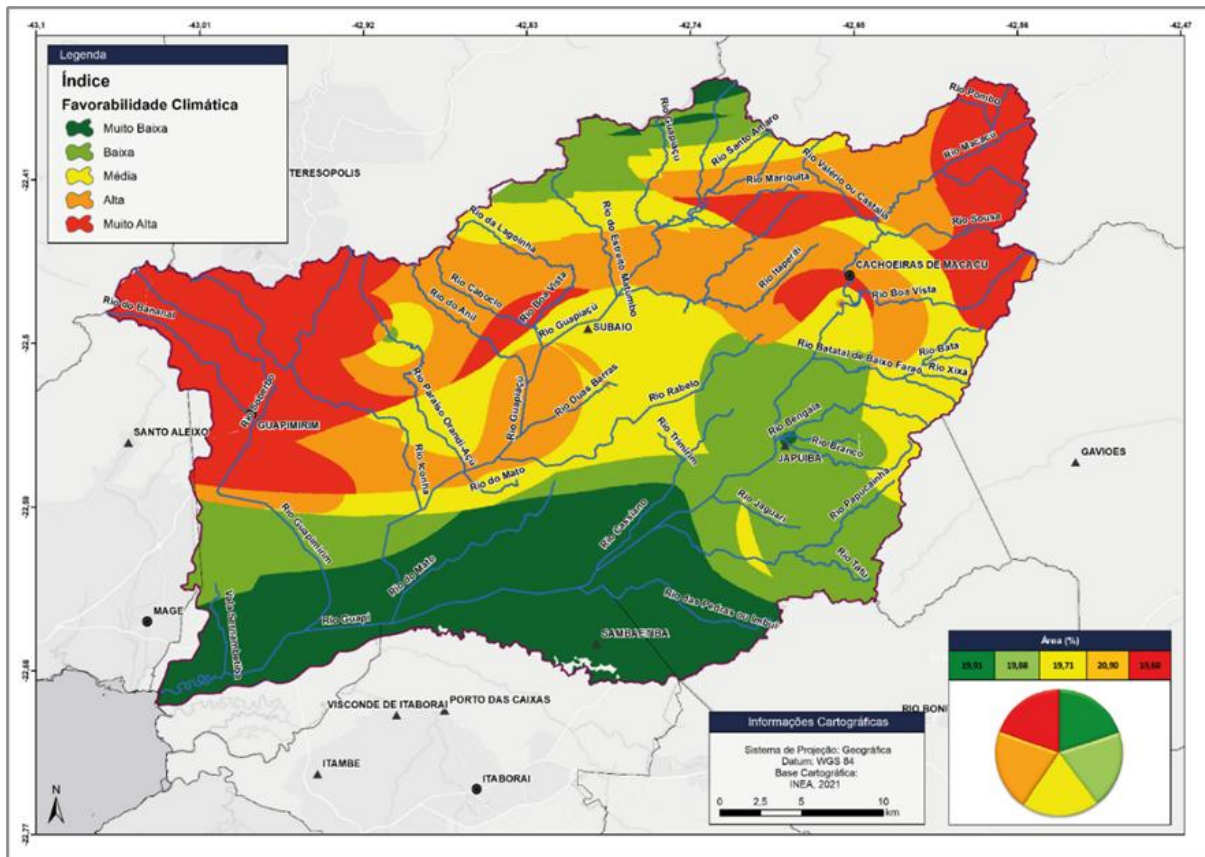


Figura 10. Mapa índice de favorabilidade climática para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro

É importante ressaltar que foi verificada uma marcada tendência de aumento da precipitação média anual no sentido sul/sudoeste-nordeste. Esse fator de distribuição espacial das chuvas está diretamente associado ao orográfico da Serra do Mar, que funciona como uma barreira natural para massas de ar úmidas advindas do oceano atlântico, gerando chuvas mais abundantes em sua proximidade. Nesse sentido, destacam-se as áreas limítrofes aos municípios de Nova Friburgo e Teresópolis, próximo às sedes municipais de Cachoeira de Macacu e Guapimirim, os quais apresentam os maiores volumes de precipitação anual.

As informações sobre o número máximo de dias consecutivos de seca apresentam comportamento um pouco diferente, com resultados apresentados em ordem inversa, ou seja, as áreas de muito alta prioridade são aquelas em que se verificou menor número de dias de seca.

Para a bacia do rio Guapi Macacu, os valores obtidos apresentam uma variação de 14 a 24 dias sem chuva, sendo que, no que tange à distribuição espacial, se observa uma variação de aumento de dias de seca no sentido sudoeste/oeste – nordeste.

Os resultados apresentados mostram que as áreas com os maiores índices de Favorabilidade Climática estão situados próximos às sedes municipais de Guapimirim e Cachoeira de Macacu, devido à, respectivamente, menor número de dias consecutivos anuais sem chuva e maiores médias de volume de chuva anual.

Na região da bacia que faz a divisa entre Cachoeira de Macacu com Itaboraí e com Rio bonito os valores do índice de Favorabilidade Climática são baixos, se estendendo até próximo da região central da bacia. Esta área apresenta valores entre médio a alto.

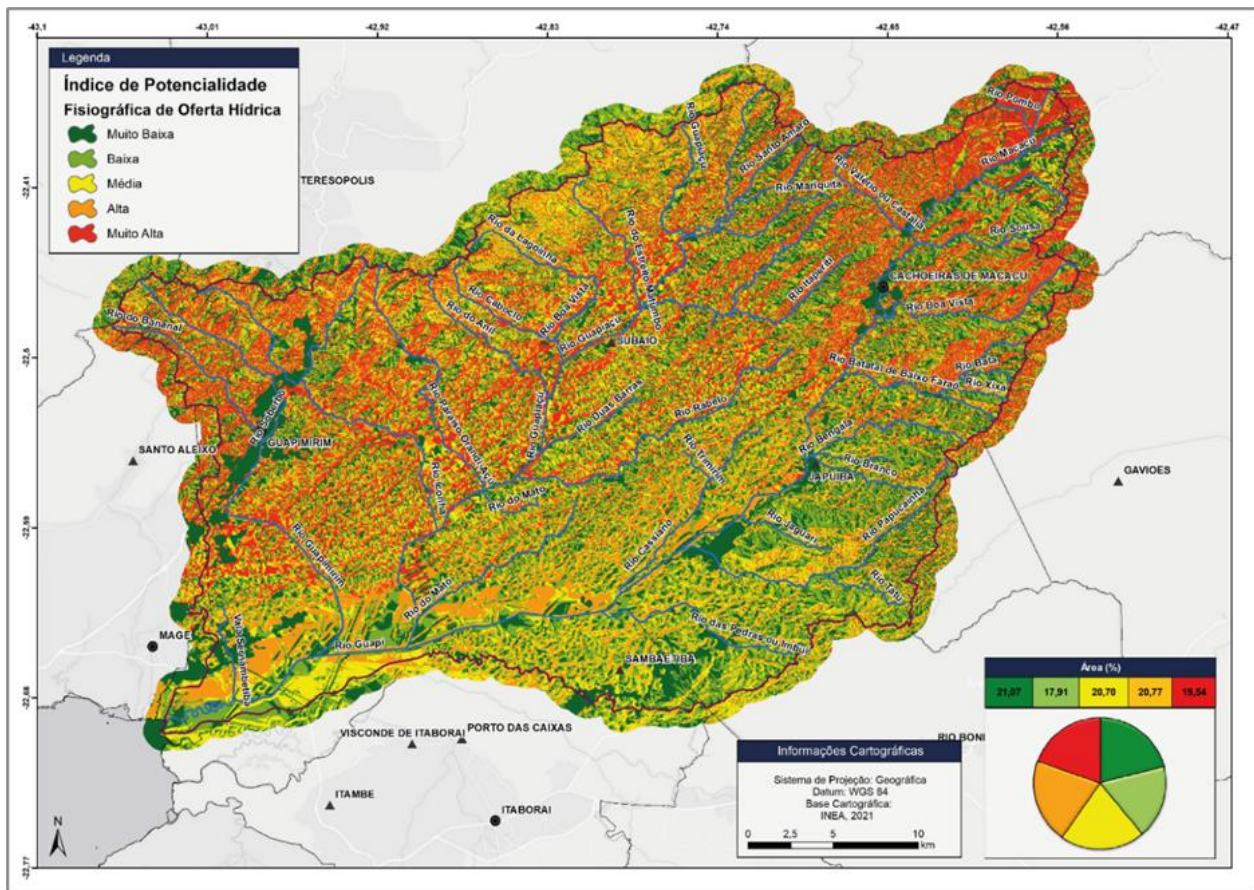


Figura 11. Mapa índice de potencialidade fisiográfica de oferta hídrica bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro

A distribuição espacial das informações produzidas para o índice de Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica demonstra haver uma concentração de valores alto e muito alto no alto curso da bacia. Nesse caso, a predisposição à oferta água se deve tanto aos maiores volumes de chuva anual das regiões serranas, quanto à maior presença de vertentes com orientação Sul-Sudeste, tendendo assim a possuir menores taxas de insolação e consequentemente evapotranspiração.

Os maiores níveis de prioridade encontrados para o indicador de Geomorfologia e Umidade do Solo na bacia do rio Guapiaçu também se evidenciam no resultado final do índice de Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica, pela marcada presença de áreas prioritárias nessa sub-bacia hidrográfica.

Índice de Potencialidade Ambiental para Restauração Florestal

O índice de Potencialidade Ambiental para Restauração Florestal foi elaborado a partir de duas informações base: Suporte para a Conservação da Biodiversidade; e Potencial de Regeneração Natural. A Figura 12 apresenta o resultado do

mapeamento de Suporte para Conservação da Biodiversidade da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu.

Os resultados obtidos demonstram que mais de 70% da área de estudo conformou unidades de paisagem em hexágonos com percentuais de cobertura vegetal menor que 10% ou maior que 50%, sendo assim classificados como de muito baixa prioridade para restauração florestal.

Essa característica marcadamente associada às cabeceiras de drenagem se deve à expressiva cobertura vegetal dessa porção da bacia hidrográfica, conservada devido à presença de Áreas de Proteção Ambiental, Refúgios da Vida Silvestre e Monumentos Naturais nas Unidades de Conservação de esfera Municipal, Estadual e Federal.

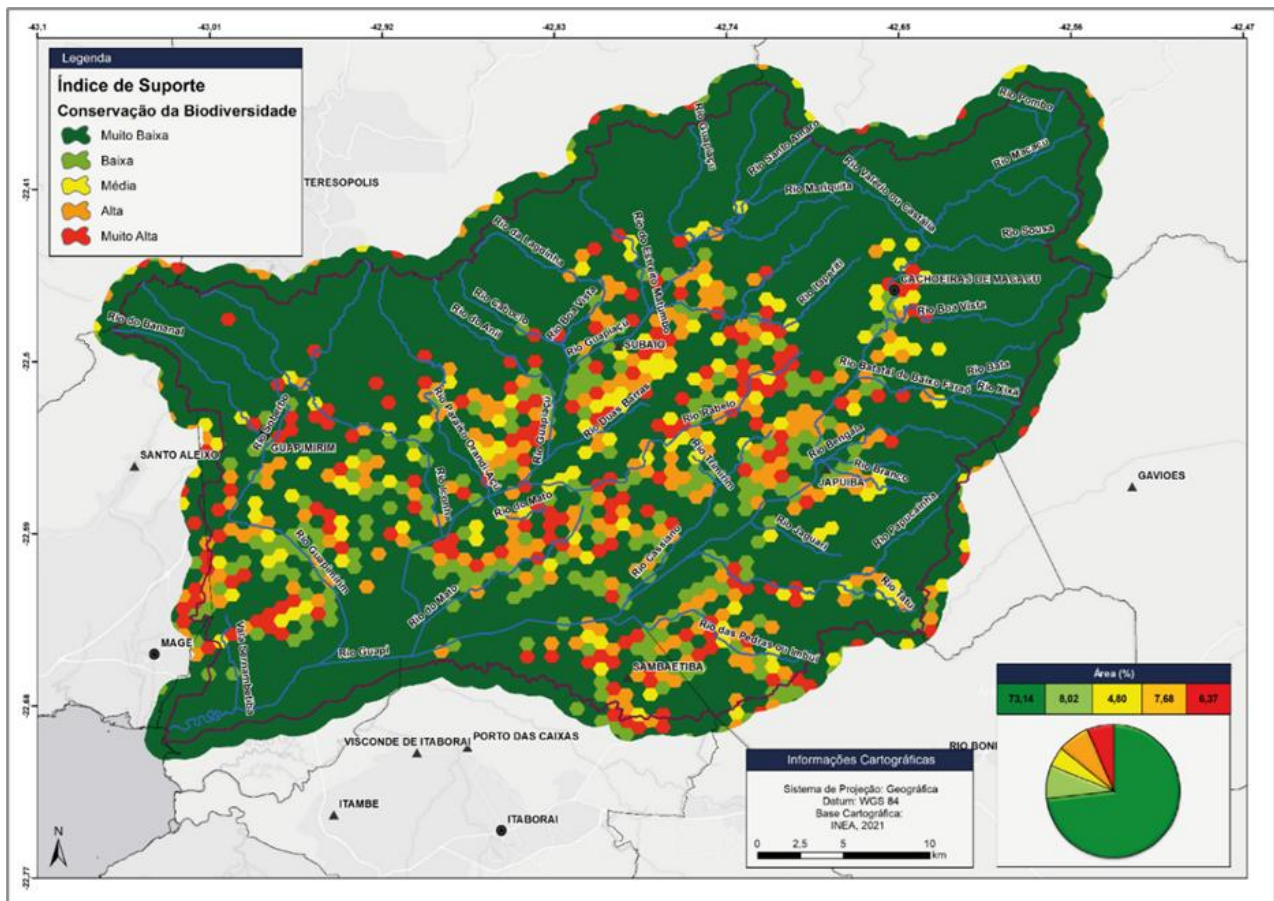


Figura 12. Mapa índice de suporte para conservação da biodiversidade da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro

As zonas de muito baixa prioridade por possuírem apenas 10% de cobertura vegetal estão principalmente associadas às áreas das tipologias de Campo/ Pastagem e Agricultura, que se estendem longo dos vales e planícies fluviais dos principais cursos d'água da região.

As áreas com maior potencial para suporte da biodiversidade estão principalmente relacionadas às paisagens em que se evidencia uma mosaico de diferentes tipologias de uso do solo, em que a presença de florestas se dá concomitantemente à distribuição de classes antrópicas como de Campo / Pastagem e Agricultura, marcadamente evidenciadas em regiões de transição entre os cursos alto e médio das sub-bacias hidrográficas dos principais rios da região. Nesse sentido, é possível verificar expressiva presença de unidades de paisagem com alta prioridade ao longo do vale fluvial dos rios Rabelo, Guapiaçu e Macacu, assim como em áreas próximas das sedes municipais e distritais de Cachoeira de Macacu, Guapimirim, Sambaetiba e Subaio.

O mapa de Potencial de Regeneração Natural pode ser visto na Figura 13.

Os resultados obtidos demonstram que a região do alto curso da bacia apresenta majoritariamente áreas com muito baixo potencial para restauração florestal. Esse fator se deve principalmente à escassez de áreas disponíveis para a condução por regeneração natural contíguas aos fragmentos florestais, os quais conformam grande parte de seu território, este por sua vez composto por Unidades de Conservação.

As áreas com maior presença de níveis alto e muito alto se associam à presença de extensas porções territoriais que conjuguem áreas não florestadas contíguas à fragmentos florestais, e à composição dos fragmentos ao longo das unidades de paisagem dispostas em seus territórios. Nesse sentido, algumas regiões merecem destaque, a saber: Os vales fluviais dos rios Rabelo, Tatu, das Pedras ou Imbuí, do Estreito Matumbo, Duas Barras, Guapiaçu e Soberbo, e as sedes municipais e distritais de Cachoeiras de Macacu, Guapimirim, Sambaetiba, Subaio e Japuíba.

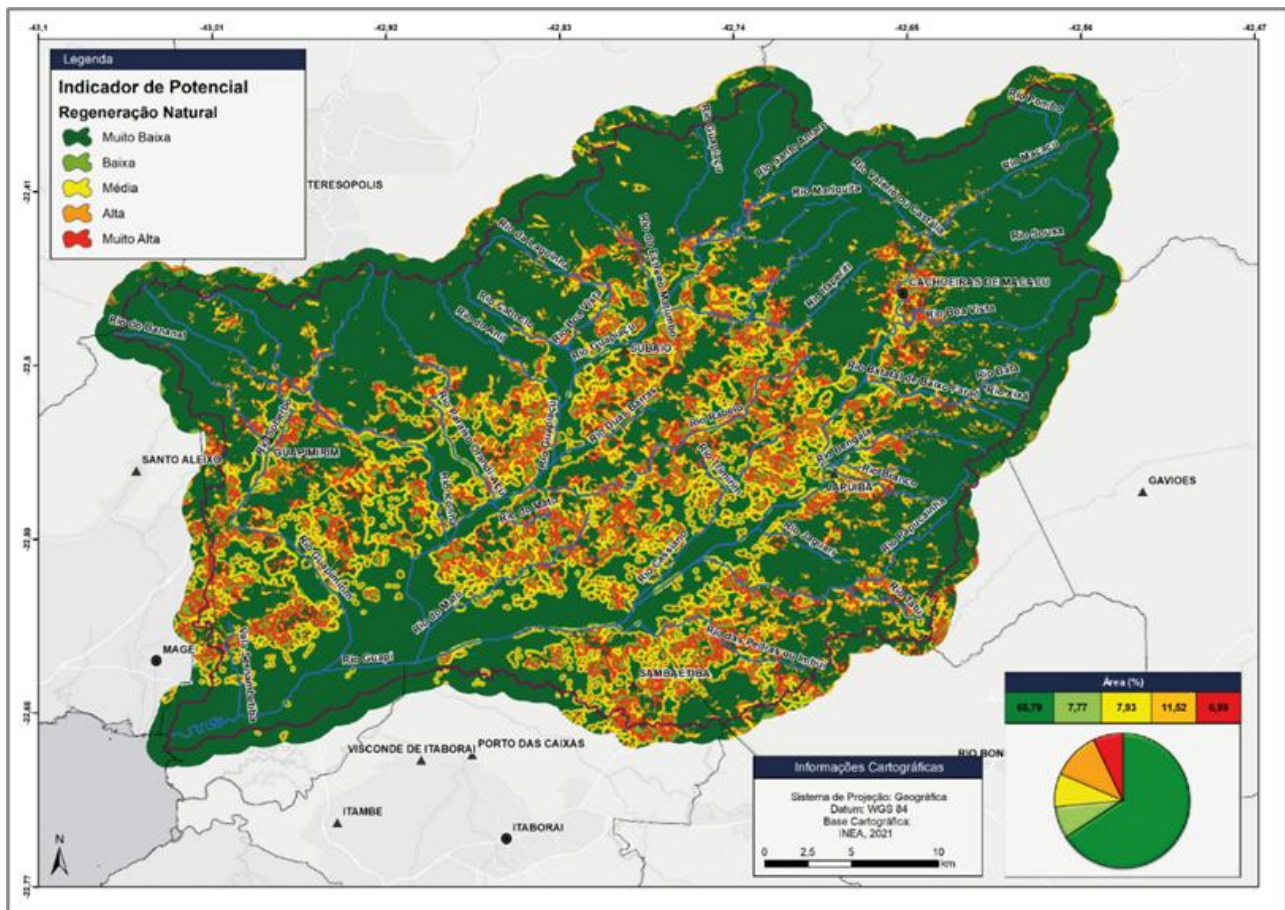


Figura 13. Mapa índice de regeneração natural para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro

A Figura 14 apresenta o mapa que representa o índice de Potencialidade Ambiental para Restauração Florestal da bacia do rio Guapi-Macacu.

Os resultados obtidos demonstram que a distribuição espacial das áreas de maior ou menor prioridade seguem as características associadas de seus indicadores constitutivos. Nesse sentido, o alto curso da bacia apresenta valores predominantemente de prioridade muito baixa para restauração florestal, devido à marcada predominância de fragmentos florestais conservados por conta das Unidades de Conservação deste território.

Em relação às áreas de maior prioridade para restauração, algumas sub-bacias hidrográficas merecem destaque, a saber: rios Rabelo, Tatu, das Pedras ou Imbuí, do Estreito Matumbo e Duas Barras. Além disso, algumas sedes distritais se tornam proeminentes, por apresentarem larga distribuição de áreas prioritárias: Sambaetiba, Subaio e Jatuíba.

Áreas Prioritárias de Restauração Florestal

A Figura 15 apresenta o mapa que representa o produto de áreas prioritárias de restauração florestal da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu.

Os resultados obtidos indicam que mais de 80% do território da bacia foi classificado como de muito baixa prioridade para restauração, em razão da predominância de usos e coberturas do solo consolidadas, tais como afloramentos rochosos, áreas urbanas, silvicultura e corpos d'água, totalizando aproximadamente 79.474 hectares. Esse padrão já foi observado em estudos similares, que destacam a necessidade de uma abordagem diferenciada para a restauração florestal, considerando a aptidão ambiental das áreas e sua viabilidade ecológica (Muchaill et al., 2024).

A identificação de 46.750 hectares prioritários para restauração foi distribuída em dois grupos principais: Áreas de Alta e Muito Alta Prioridade. Notavelmente, as áreas de muito alta prioridade concentram-se na bacia do rio Guapiaçu, o que pode ser atribuído ao índice de Potencialidade Fisiográfica de Oferta Hídrica, que reflete a maior retenção de umidade do solo nesta região.

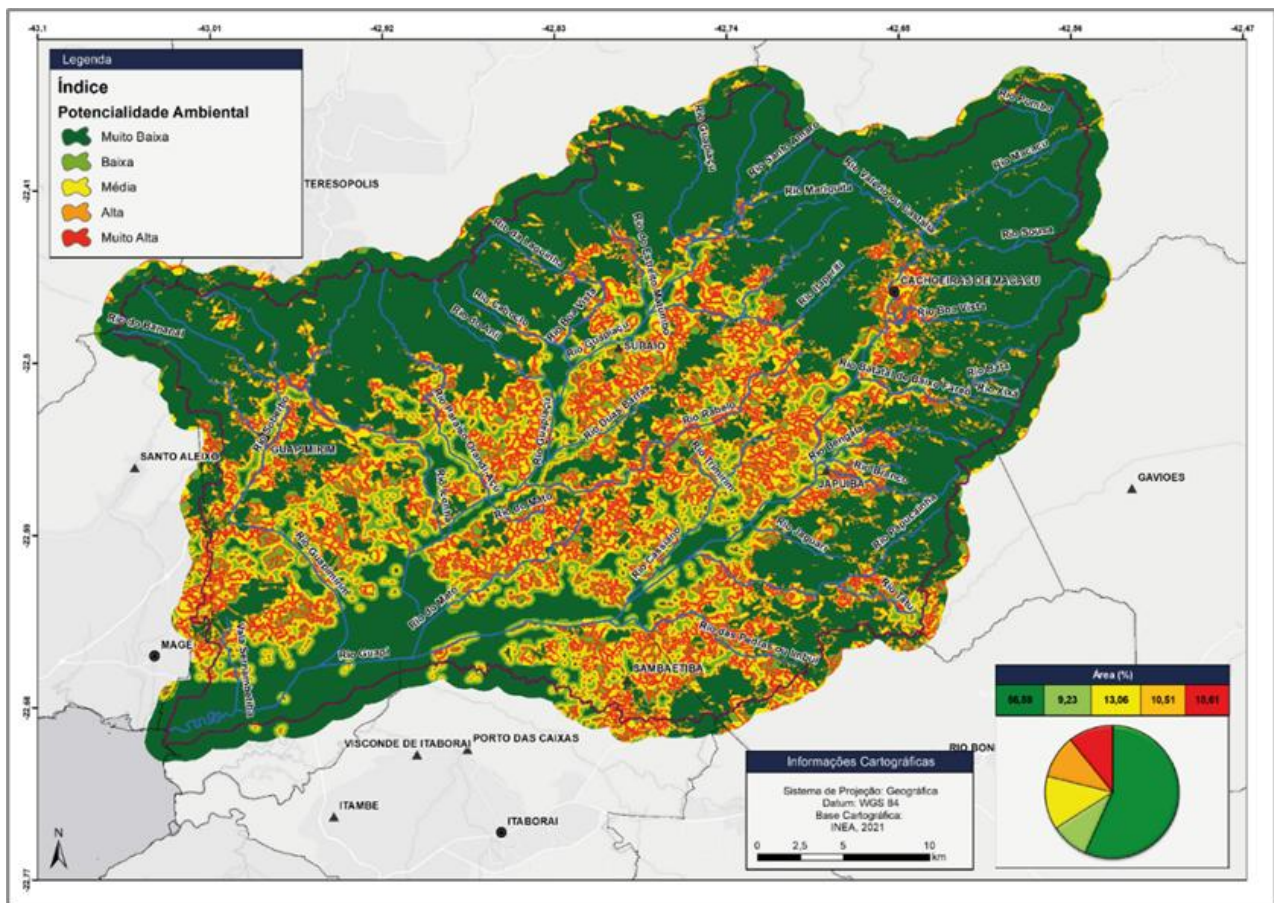


Figura 14. mapa índice de potencialidade ambiental para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro

Esses achados corroboram pesquisas que enfatizam a relevância de fatores geomorfológicos e hídricos na priorização da restauração florestal, pois a presença de solos mais úmidos favorece a regeneração natural e o sucesso da revegetação (da Silva Ximenes, dos Santos & da Silva, 2024).

A análise da Potencialidade Ambiental revelou que as áreas de muito alta prioridade tendem a estar espacialmente conectadas a fragmentos florestais existentes, o que reforça a importância da conectividade ecológica no planejamento da restauração. Trabalhos recentes destacam que a proximidade de fragmentos facilita a dispersão de sementes e a recuperação da biodiversidade, além de potencializar os serviços ecossistêmicos associados à proteção dos mananciais hídricos (Asevedo et al., 2022).

Esse fenômeno também foi descrito em estudos aplicados a áreas estratégicas do estado do Paraná, onde o mapeamento atualizado de fragmentos florestais indicou a ampliação de áreas estratégicas para conservação de 11,95% para 25,45% do território estadual ao longo dos anos, demonstrando a eficácia dessas metodologias no planejamento ambiental (Muchailh et al., 2024).

Além disso, algumas sub-bacias hidrográficas mostraram forte presença de áreas de alta e muito alta prioridade para restauração, incluindo os rios Rabelo, Tatu, das Pedras ou Imbuí, Estreito Matumbo e Duas Barras, bem como regiões próximas a Sambaetiba, Subaio, Jatuíba, Cachoeira de Macacu e Guapimirim. Esse padrão reforça a necessidade de uma abordagem territorializada, conforme defendido por dos Santos (2024), que destaca a importância de integrar variáveis socioeconômicas e ambientais na identificação de áreas prioritárias para Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), garantindo a efetividade das políticas de incentivo à restauração.

A modelagem espacial e o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido amplamente reconhecidos como ferramentas

eficazes para priorizar ações de restauração. Fonseca (2024) demonstrou, por meio da modelagem determinística e probabilística, que a restauração florestal pode ser economicamente mais vantajosa do que a manutenção de pastagens, especialmente quando associada à venda de créditos de carbono. Esse tipo de análise é essencial para embasar políticas públicas voltadas à recuperação ambiental, garantindo que os investimentos sejam alocados de maneira eficiente e sustentável.

Conclusões

Este estudo identificou 46.750 hectares de áreas aptas para restauração florestal na bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, sendo 36 mil hectares compostos por campos e pastagens e 10 mil hectares por áreas agrícolas. A análise espacial revelou que as áreas prioritárias estão concentradas em glebas próximas a sedes distritais e municipais, como Sambatiba, Subaio, Jatuíba, Cachoeira de Macacu e Guapimirim, e ao longo de sub-bacias hidrográficas, incluindo os rios Rabelo, Tatu, das Pedras ou Imbuí, Estreito Matumbo e Duas Barras.

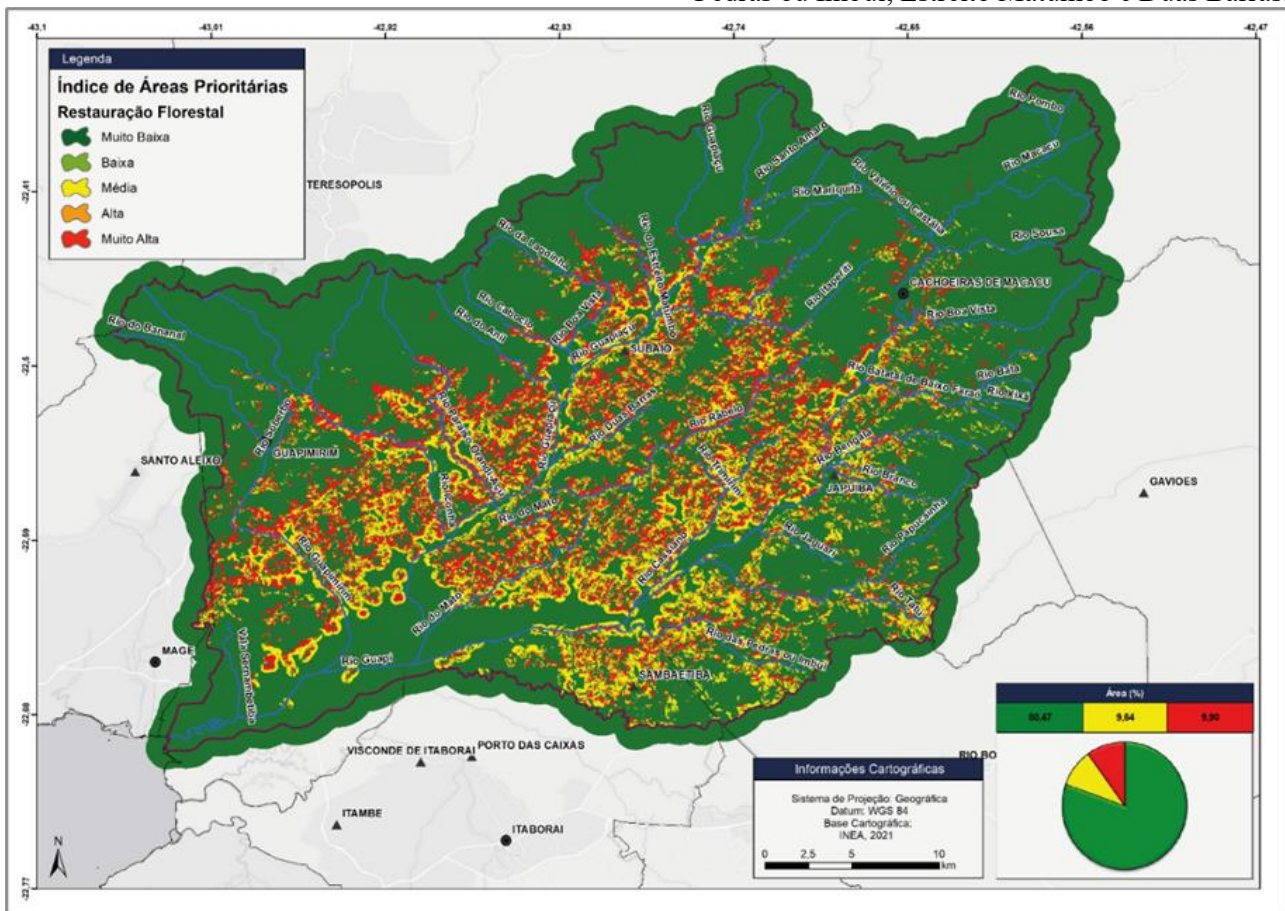


Figura 15. Mapa índice de áreas prioritárias de restauração florestal para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, Rio de Janeiro

Portanto, os resultados obtidos neste estudo confirmam a relevância de abordagens integradas para a priorização de áreas de restauração florestal, aliando critérios fisiográficos, ecológicos e socioeconômicos. A combinação dessas variáveis em análises multicritério não apenas facilita a tomada de decisão, como também otimiza os recursos destinados à conservação da biodiversidade e ao fortalecimento dos serviços ecossistêmicos essenciais à segurança hídrica regional.

Essas regiões apresentam maior potencial fisiográfico para oferta hídrica e estão próximas a fragmentos florestais, favorecendo a conectividade ecológica.

Os resultados confirmam a hipótese de que a análise multicritério é uma abordagem eficaz para a definição de áreas prioritárias para restauração florestal, conforme apontado em estudos recentes (da Silva Ximenes et al., 2024; Muchailh et al., 2024). Esse método permitiu identificar regiões com maior viabilidade para intervenção, considerando fatores ambientais e hidrológicos, e demonstrou alinhamento com pesquisas que

destacam a importância da conectividade entre fragmentos florestais e o potencial regenerativo do solo na recuperação da cobertura vegetal (Asevedo et al., 2022).

A delimitação das áreas prioritárias para restauração florestal na bacia do rio Guapi-Macacu tem implicações diretas para a proteção dos mananciais hídricos, reforçando a necessidade de estratégias integradas que aliem conservação e produção sustentável. Dado o valor econômico das áreas de campo, pastagens e sítios agrícolas, recomenda-se a implementação de sistemas agroflorestais e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) como alternativas para ampliar a cobertura vegetal sem comprometer a viabilidade socioeconômica dessas regiões. Estudos como os de dos Santos (2024) reforçam que tais estratégias não apenas aumentam a resiliência dos ecossistemas, mas também melhoram a retenção hídrica e a sustentabilidade das paisagens produtivas.

Portanto, a restauração florestal na bacia do rio Guapi-Macacu deve ser planejada de maneira integrada, combinando análises espaciais detalhadas com práticas de uso sustentável da terra. A adoção de políticas públicas baseadas nesses critérios pode otimizar investimentos, fortalecer a segurança hídrica regional e garantir a manutenção dos serviços ecossistêmicos fundamentais para a sustentabilidade da região.

Agradecimentos

Agradecimentos especiais à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ, e à toda equipe do Laboratório Interdisciplinar de Estudos Geoambientais da UFRJ – LIEG.

Referências

Araújo, L. P. D. (2024). Análise do uso, cobertura da terra e geração de escoamento com base no modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) com paisagem cárstica no alto da Bacia do Rio Corrente (GO) [Tese de doutorado, Universidade de Brasília]. Disponível em <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/49282>

Asevedo, L. A., Moraes, A. C., Silva, D., Muniz, P., Moreira, G. V., & Horta, T. (2022). Análise multicritério do território para definição de áreas prioritárias para restauração florestal. Seminário Regional Sobre Gestão de Recursos Hídricos.

Banks-Leite, C., Pardini, R., Tambosi, L. R., Pearse, W. D., Bueno, A. A., Bruscagin, R. T.,

... & Metzger, J. P. (2014). Using ecological thresholds to evaluate the costs and benefits of set-asides in a biodiversity hotspot. *Science*, 345(6200), 1041-1045. <https://doi.org/10.1126/science.1255768>

- Benavides, Z. C., Cintrão, R. P., Fidalgo, E. C. C., Pedreira, B. C. C. G., & Prado, R. B. (2009). Consumo e abastecimento de água nas bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu, RJ.
- Bonumá, N. B., Reichert, J. M., Rodrigues, M. F., Monteiro, J. A. F., Arnold, J. G., & Srinivasan, R. (2015). Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport, and future scenarios with the ecohydrological SWAT model in Brazilian watersheds and river basins. *Tópicos em Ciência do Solo*, 9, 241-290.
- Crouzeilles, R., Curran, M., Ferreira, M. S., Lindenmayer, D. B., Grelle, C. E., & Benayas, J. M. R. (2016). A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. *Nature Communications*, 7, 11666. <https://doi.org/10.1038/ncomms11666>
- Dantas, M. E., Renk, J. F. C., Shinzato, E., Souza, L. V. D., Calderano, S. B., Fidalgo, E. C. C., & Aranda, C. C. C. (2012). Geomorfologia das bacias dos rios Guapi-Macacu e Caceribu – Recôncavo da Baía de Guanabara – Estado do Rio de Janeiro.
- Da Silva Ximenes, G. T., dos Santos, L. F. U., & da Silva, J. A. F. (2024). Seleção de áreas prioritárias para reflorestamento em bacias hidrográficas na região sudeste do Brasil. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 22(3), e3569-e3569. <https://doi.org/10.55905/oelv22n3-012>
- Dos Santos, Z. L. (2024). Apoio à tomada de decisão para identificação de áreas prioritárias para implementação de Programa de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) [Tese de doutorado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”].
- Dobrovolski, R., & Rattis, L. (2015). Water collapse in Brazil: The danger of relying on what you neglect. *Natureza & Conservação*, 13(1), 80-83. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2015.03.006>
- FAO. (2010). Planted forests in sustainable forest management: A statement of principles. Food and Agricultural Organization.
- Ferraz, S. F., Ferraz, K. M., Cassiano, C. C., Brancalion, P. H. S., da Luz, D. T., Azevedo, T. N., ... & Metzger, J. P. (2014). How good are

- tropical forest patches for ecosystem services provisioning? *Landscape Ecology*, 29, 187-200. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-9988-z>
- Ferreira, C. E. G. (2012). Sistema de suporte à decisão espacial aplicado à análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na bacia Guapi-Macacu/RJ [Tese de doutorado, Embrapa Solos].
- Filoso, S., Bezerra, M. O., Weiss, K. C. B., & Palmer, M. A. (2017). Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. *PLoS ONE*, 12(8), e0183210. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183210>
- Fonseca, C. O. (2024). Modelagem de uso da terra e cenários de restauração de Mata Atlântica: O entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro/MG [Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais].
- Francisco, C. E. S., Coelho, R. M., Torres, R. B., & Adami, S. F. (2008). Análise multicriterial na seleção de bacia hidrográfica para recuperação ambiental. *Revista Ciência Florestal*, 18(1), 1-13. <https://doi.org/10.5902/198050981717>
- Instituto Estadual do Ambiente (INEA). (2018). Atlas dos mananciais de abastecimento público do Estado do Rio de Janeiro: Subsídios ao planejamento e ordenamento territorial. Rio de Janeiro, Brasil.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2013). Manual técnico de uso da terra. Manuais Técnicos em Geociências, (7).
- Júnior, A. P. M. (2007). Indicadores ambientais e recursos hídricos: Realidade e perspectivas para o Brasil a partir da experiência francesa. Bertrand Brasil.
- Miura, S., Amacher, M., Hofer, T., & San-Miguel-Ayanz, J. (2015). Ernawati; Thackway, R. Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century. *Forest Ecology and Management*, 352, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.034>
- Muchailh, M. C., Pereira, G. H., Júnior, C. C., Bastos, B., Deppe, F. A., Scharnik, M., ... & de Oliveira Santos, L. H. (2024). Aprimoramento do mapeamento de áreas estratégicas para a conservação e restauração da biodiversidade no estado do Paraná. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(2), e68723-e68723. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-009>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Nogueira, M. P. (2024). Aplicação do modelo SWAT+ na análise da integridade da zona ripária na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF) [Tese de doutorado, Universidade de Brasília]. Disponível em <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/49282>
- Postel, S. L., & Thompson, B. H. (2005). Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Natural Resources Forum*, 29, 98-108. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2005.00119.x>
- Rodrigues, R. R., Isernhagen, I., & Brancalion, P. H. S. (2009). Pacto pela restauração da Mata Atlântica: Referencial dos conceitos e ações de restauração florestal. LERF/ESALQ, Instituto BioAtlântica.
- TEEB. (2010). Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. UNEP.
- Vettorazzi, C. A. (2006). Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos [Tese de Livre Docência, USP-ESALQ].