



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO
DE FLORESTAS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

**CENÁRIOS DE ÁREAS DEGRADADAS EM RECUPERAÇÃO NA FLONA DO
JAMARI, RONDÔNIA**

Micael Cortopassi Booth

2017



UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

CENÁRIOS DE ÁREAS DEGRADADAS EM RECUPERAÇÃO NA FLONA DO
JAMARI, RONDÔNIA

MICAEL CORTOPASSI BOOTH

Sob a orientação do Professor
Márcio Rocha Francelino

e Co-orientação do Professor
Bruno Araujo Furtado de Mendonça

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Conservação da Natureza.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2017

Ficha catalográfica

C725c Cortopassi Booth, Micael, 1985-
Cenários de Áreas Degradadas em Recuperação na
FLONA do Jamari, Rondônia / Micael Cortopassi Booth. 2017.
81 f.: il.

Orientador: Marcio Rocha Francelino.
Coorientador: Bruno Araujo Furtado de Mendonça.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Pós graduação em Ciências
Ambientais e Florestais, 2017.


1. Florestas. 2. Modelagem Ambiental. 3.
Recuperação de Áreas Degradadas. 4. Sensoriamento
Remoto. 5. Simulação de Cenários. I. Rocha Francelino,
Marcio, 1966-, orient. II. Araujo Furtado de Mendonça,
Bruno, 1981-, coorient. III Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Pós graduação em Ciências
Ambientais e Florestais. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

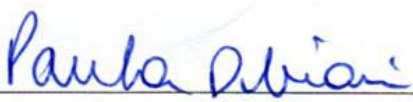
MICAEL CORTOPASSI BOOTH

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração em Conservação da Natureza.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22 / 02 / 2017


Márcio Rocha Francelino. Prof. Dr. UFRRJ.
(Orientador)


Eduardo Vinicius da Silva. Prof. Dr. DS/UFRRJ


Paula Debiasi. Prof. Dr^a. IT/UFRRJ


Waldir Carvalho Junior. Pesquisador. Dr. Embrapa Solos

AGRADECIMENTOS

Ao Pai Criador, por estar sempre ao meu lado, aos meus pais Nereida e Michael pelo amor incondicional e ajuda. A caminhada foi dura, mas com muitos ensinamentos.

A minha irmã Yasmine, pela confiança.

A minha querida Estela pelo carinho, confiança e empurrões.

Ao meu padrinho Lino pelos conselhos.

Ao professor Márcio Francelino em especial por me orientar, qualificar, ter paciência e não desistir desse projeto.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais pela oportunidade de me tornar Mestre.

A Capes por me conceder uma bolsa de estudos durante todo o período de mestrado.

Aos professores do Instituto de Florestas da UFRRJ e do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa por compartilhar o conhecimento e dar suporte para me formar.

RESUMO

BOOTH, Micael Cortopassi. **Cenários de Áreas Degradadas em Recuperação na FLONA do Jamari/RO**. 2017. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais, Conservação da Natureza). Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

A utilização de geotecnologias auxilia no acompanhamento e quantificação do desenvolvimento e modificação da paisagem. A região Amazônica tem alta diversidade e riqueza vegetal e é nesse bioma que está a área de estudo, na Floresta Nacional do Jamari, uma Unidade de Conservação de uso múltiplo. Nessa FLONA há oito minas sob um PRAD pois houve desde a década de 1960 a exploração e lavra de cassiterita para obtenção de estanho. A abertura de cavas para a exploração é feita a céu aberto, realizada de forma quase toda mecânica, ficando o ambiente ao final muito degradado e sua restauração demanda recursos e tempo. De modo geral, a recuperação da paisagem de uma área de lavra é feita com o uso de plantio de espécies heterogêneas do mesmo bioma, visando recobrir o solo e induzir a regeneração natural. Nas áreas de minas o tipo de substrato influencia no desenvolvimento e fixação das espécies vegetais na área. Os objetivos foram mapear a cobertura do solo, a criação de cenários futuros de revegetação usando um programa de predição. Nestas minas foram mapeados os tipos de substratos que são classificadas em piso de lavra (PL), rejeito seco (RS), rejeito úmido (RU), rejeito capeado e washing plant (WP). Utilizando quatro imagens de alta resolução espacial dos anos 2009, 2011, 2013 e 2015, foram classificadas as tipologias solo exposto, campo sujo, capoeira, vegetação rala, intermediária, densa. As áreas ocupadas por cada tipologia, para cada um dos anos estudados nas minas foram comparados visando quantificar as áreas convertidas de solo exposto em áreas vegetadas e a dinâmica da cobertura vegetal presente. Cenários futuros para os anos de 2020 a 2065 foram modelados utilizando o Dinâmica-EGO, programa utilizado para simulação e predição de ambientes naturais em especial desmatamento. A validação dos mapas gerados foi feita utilizando similaridade *fuzzy*. Os resultados obtidos para os cenários futuros foram em similares ao observado e a dinâmica das cinco tipologias utilizadas evoluíram de forma condizente com o observado, tendo algumas minas melhor desenvolvimento em um menor tempo de acordo com o tipo de substrato e idade dos plantios.

Palavras-chave: PRAD, modelagem vegetal, Dinâmica-EGO, cenários futuros, mineração.

ABSTRACT

BOOTH, Micael Cortopassi. **Cenários de Áreas Degradadas em Recuperação na FLONA do Jamari/RO**. 2017. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais, Conservação da Natureza). Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

The use of geotechnologies assists in the monitoring and quantification of the development and modification of the landscape. The Amazon region has high diversity and plant richness and it is in this biome that is the study area, in the National Forest of Jamari, is a Conservation Unit of Multiple Use. In this FLONA there are eight mines under a PRAD because there has been since the 1960s the exploration and mining of cassiterite to obtain tin. The opening of cavas for the exploration is done in the open, performed almost mechanically, leaving the environment at the end very degraded and its restoration demands resources and time. In general, the recovery of the landscape of an area of cultivation is done with the use of planting heterogenous species of the same biome, aiming to cover the soil and induce natural regeneration. In the areas of mines the type of substrate influences in the development and fixation of the vegetal species in the area. The objectives were to map the soil cover, the creation of future scenarios of revegetation using a prediction program. In these mines the types of substrates that were classified in tillage (PL), dry tail (RS), wet tail (RU), washed tail and washing plant (WP) were mapped. Using four high spatial resolution images of the years 2009, 2011, 2013 and 2015, the typologies were classified as soil exposed, field dirty, capoeira, vegetation thin, intermediate, dense. The areas occupied by each typology for each of the years studied in the mines were compared in order to quantify the converted areas of exposed soil in vegetated areas and the dynamics of the present vegetation cover. Future scenarios for the years 2020 to 2065 were modeled using the Dinamica-EGO, a program used for simulation and prediction of natural environments in particular deforestation. The validation of the generated maps was done using fuzzy similarity. The results obtained for the future scenarios were similar to those observed and the dynamics of the five typologies used evolved in a manner consistent with that observed, with some mines having a better development in a shorter time according to the type of substrate and age of the plantations.

Keywords: PRAD, forest modeling, Dinamica-EGO, futures scenes, mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da FLONA Jamari, as minas em recuperação e municípios vizinhos	23
Figura 2. Exemplo classificação classe de <i>solo exposto</i>	26
Figura 3. Exemplo classificação classe de <i>campo sujo</i>	27
Figura 4. Exemplo classificação classe de <i>vegetação rala</i>	27
Figura 5. Exemplo classificação classe de <i>vegetação intermediária</i>	28
Figura 6. Exemplo classificação classe de <i>vegetação densa</i>	28
Figura 7. Exemplo classificação classe de <i>plantio de mudas</i>	29
Figura 8. Localização das Minas e substratos mapeados	30
Figura 9. Fluxograma do programa Dinâmica-EGO. Adaptado de Soares-Filho (2002)	34
Figura 10. Detalhes da Mina 14 de Abril em formato vetor (<i>shape</i>) e <i>raster</i>	35
Figura 11. Modelo de cálculo da matriz de transição entre os anos de 2011 a 2013.....	37
Figura 12. Modelo de cálculo da matriz de transição entre os pares de anos.....	38
Figura 13. Modelo de cálculo dos pesos de evidencia das variáveis para cada uma das transições para a passagem do ano inicial para o final.....	39
Figura 14. Modelo de simulação uma paisagem futura para a partir da observação de uma paisagem inicial.....	40
Figura 15. Modelo de cálculo do tamanho das manchas e desvio padrão para cada transição entre os pares de anos	41
Figura 16. Método de comparação Fuzzy usando mapa de diferenças e uma função de decaimento constante. Fonte: Piontekowski, (2014)	42
Figura 17. Taxas de conversão para os pares de anos nos anos de 2009 a 2015, dinâmica da conversão das tipologias identificadas nas minas para os 4 anos de estudo.....	44
Figura 18. Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina 14 de Abril para os 4 anos de estudo.....	46
Figura 19. Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Cacimba para os 4 anos de estudo.....	47
Figura 20. Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Duduca para os 4 anos de estudo.....	48
Figura 21. Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Novo Mundo para os 4 anos de estudo.....	49
Figura 22. Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Poço B para os 4 anos de estudo.....	50
Figura 23. Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Potosí para os 4 anos de estudo.	50
Figura 24. Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Santa Maria para os 4 anos de estudo.....	51
Figura 25. Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Serra da Onça para os 4 anos de estudo.....	52
Figura 26 a,b,c. Mapa simulado para 2015 partir da observação do ano de 2013, exemplo mina Cacimba.....	54
Figura 27. Modelo de similaridade entre os dados observados e o simulado.....	55
Figura 28. Gráfico de similaridade do cenário simulado para o observado no ano de 2011 em função de	

decaimento constante.....	56
Figura 29. Gráfico de similaridade do cenário simulado para o observado no ano de 2013 em função de decaimento constante.....	56
Figura 30. Gráfico de similaridade do cenário simulada para o observado no ano de 2015 em função de decaimento constante.....	57
Figura 31. Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina 14 de Abril.....	58
Figura 32. Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina 14 de Abril.....	58
Figura 33. Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Cacimba.....	59
Figura 34. Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Cacimba.....	59
Figura 35. Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Duda.....	60
Figura 36. Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Duda.....	60
Figura 37. Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Novo Mundo.....	61
Figura 38. Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Novo Mundo.....	61
Figura 39. Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Poço B.....	62
Figura 40. Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Poço.B.....	63
Figura 41. Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Potosí.....	63
Figura 42. Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Potosí.....	64
Figura 43. Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Santa Maria.....	64
Figura 44. Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Santa Maria.....	65
Figura 45. Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Serra da Onça.....	66
Figura 46. Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Serra da Onça.....	66
Figura 47. Gráfico da área ocupada de <i>solo exposto</i> no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.....	67
Figura 48. Gráfico da área ocupada de <i>campo sujo</i> no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.....	68
Figura 49. Gráfico da área ocupada de <i>vegetação rala</i> no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.....	68
Figura 50. Gráfico da área ocupada de <i>vegetação intermediária</i> no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.....	69

Figura 51. Gráfico da área ocupada de <i>vegetação densa</i> no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.....	70
Figura 52. Gráfico da área ocupada pelas classes de cobertura vegetal ano de 2035.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos sensores dos satélites utilizados.....	25
Tabela 2 - Valores dos pesos de evidência para as faixas de distância da variável declividades (slope) para a transição de <i>solo exposto</i> para <i>campo sujo</i>	53

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. Restauração de Áreas Degradadas.....	17
2.2. Sensoriamento Remoto.....	18
2.3. Modelagem e Predição em Ambientes Florestais.....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Área de Estudo.....	23
3.2. Levantamento de Uso do Solo.....	25
3.2.1. Classes de Cobertura.....	26
3.3. Modelador Dinâmica-EGO.....	29
3.4. Variáveis Locais.....	29
3.5. Influência do Tipo de Substrato.....	30
3.5.1. Piso de Lavra.....	31
3.5.2. Área de Deposito de Rejeito.....	31
3.5.3. Área do Tipo de <i>Whashing Plant</i>	33
3.6. Criação de Cenários.....	33
3.7. Validação dos Modelos.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Aporte da Vegetação.....	43
4.2. Dinâmica da Cobertura.....	52
4.2.1. Resultados obtidos com os modelos.....	52
4.2.2. Simulação de cenários.....	57
5. CONCLUSÕES	71
6. AGRADECIMENTOS	72
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	73
8. ANEXOS	79

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC - LEI 9.985/2000) - é o conjunto diretrizes que regem as unidades de conservação (UC) federais, estaduais e municipais. Esta divide as unidades brasileiras em duas categorias: as de proteção integral, que permitem o uso indireto dos recursos naturais, tendo a preservação dos ecossistemas como seu principal objetivo; e as de uso sustentável, que podem ser utilizadas de forma sustentável, mas mantendo conservadas ao mesmo tempo. Sendo composto por 12 categorias de UC, cujos objetivos específicos se diferenciam quanto à forma de proteção e usos permitidos.

As florestas nacionais (FLONA) são um tipo de UC com áreas protegidas que preconizam o uso múltiplo sustentável dos recursos naturais. Até 2016 existiam no Brasil 67 UCs dessa categoria sendo que 34 estão no bioma amazônico. No estado de Rondônia existe na sua parte central a FLONA do Jamari, que é a de maior extensão desta categoria no Brasil, criada com o intuito de proteger os recursos naturais existentes às margens da represa da Usina Hidrelétrica de Samuel (MMA, 2005).

Nesta FLONA, a partir da década de 60, foi realizada a atividade de extração mineral de Cassiterita, minério de estanho, que é utilizado nos mais variados produtos industriais, sendo a maior área de exploração deste minério no Estado. Já no início da década de 90 parte das áreas mineradas foram abandonadas. Hoje há apenas uma mina ativa e outras oito estão em processo de recuperação.

Áreas degradadas são ambientes naturais que sofreram alguma perturbação em diferentes graus, podendo ser solos degradados (seja por desmatamento, salinização, pastagens, erosão entre outros), seja por causa de resíduos industriais (pela fabricação de ferro gusa, fertilizantes, entre outros), por exploração de minérios (granito, hematita, pedreira, entre outros) entre outras modificações. Dependendo do grau de degradação são gerados maiores ou menores detrimientos ao meio ambiente, como a perda de solo, diminuição da fertilidade e capacidade de reter água, além de assoreamento dos cursos d'água (Reis et al., 1999; IBAMA, 2002; Longo et al., 2005).

Os recursos minerais e derivados destes tem papel importante na economia mundial, sendo uma atividade indispensável para a sociedade (BRASIL, 2010). Porém, a

sua exploração, em muitos casos, gera grandes modificações do ambiente, pois requer a remoção da vegetação e do solo para que se tenha acesso aos depósitos minerais (FONTES, 1991).

Dentre os tipos de exploração de minérios, a de superfície é em geral uma atividade que modifica fortemente a paisagem e o ambiente, pois é realizada retirando a vegetação, o solo superficial (*topsoil*) e rochas que estejam acima do depósito mineral. Geralmente ocorre a alteração da topografia, causando impactos também na hidrografia do local da instalação da mina. A lavra para a extração da cassiterita é do tipo de superfície, feita a céu aberto, realizada de forma quase toda mecânica, utilizando a água para separar o minério. O ambiente ao final da extração fica muito degradado e sua restauração demanda recursos devido a necessidade de instalar sucessivos processos específicos para os ambientes se reabilitarem, sempre visando melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo ou substrato presente na área, de modo a restaurar as funções ecológicas locais (MYADA, 2015).

Pesquisadores há mais de 60 anos buscam soluções para a dificuldade de se implementar programas de restauração vegetal em áreas de minas “a céu aberto”. Antes os projetos de restauração visavam apenas a necessidade de recobrimento vegetal local para diminuir e sanar problemas de erosão e aspectos estéticos. Mas a partir da década de 80, os programas de restauração passaram não só a visar a recuperação da produção primária líquida (biomassa), mas também na reabilitação nestas áreas (SALOMÃO, 2007).

Entretanto, por mais que se busque, é praticamente impossível reestabelecer o ambiente como era antes de ser alterado. O que poderá alcançar é um novo nível de equilíbrio, pois as interações existentes na natureza são demasiadamente complexas para serem replicadas por intervenções antrópicas. Porém, acompanhar os projetos de recuperação e o desenvolvimento de novas interações no campo é necessário para dar mais suporte à tomada de decisões (ESPINDOLA, 2005; BARNI, 2009).

Para que um projeto de recuperação em área degradada seja eficiente e tenha êxito é necessário que certas funções ambientais sejam cumpridas e haja interseções entre as espécies ocorrendo de forma natural, com produtividade vegetal similar ao de ambientes não perturbados e que supra as necessidades químicas e biológicas das

espécies ali presentes. Isto demonstra a necessidade de melhor compreender as complexas interações do ecossistema e também como ocorrem as modificações e a estruturação dos novos ambientes florestais no decorrer do tempo. Sendo assim necessário que haja troca gênica entre os indivíduos vegetais envolvendo dispersão de sementes e plântulas e a polinização pelos insetos (KAGEYAMA, et. al, 2003; ESPINDOLA, 2005; BRANCALION, 2015).

A criação de modelos que possam prever os resultados em ambientes naturais é algo novo e há pouca literatura para restauração ambiental em ambientes de mineração de superfície. A predição de resultados de acordo com diferentes cenários auxilia muito na tomada de decisões e no gerenciamento de recursos envolvidos na recuperação. Assim, existem ferramentas para a modelagem do ambiente, no espaço e no tempo, para estimar a mudança do uso e cobertura do solo (PERRY, 2006). Basicamente, esses modelos podem utilizar autômatos celulares, como é o caso do programa Dinâmica-EGO (SOARES-FILHO, 2002; PIONTEKOWSKI, 2012) e do Programa Landis (MLADENOFF, 2004), como também existem os modelos baseados em simulações de Monte Carlo, que é o caso da Cadeia de Markov (BAASCH, 2010; ROSA, 2013).

O software Dinâmica-EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*) é um programa livre que auxilia pesquisadores e técnicos na criação de modelos de dinâmica ambiental. Este programa computacional se baseia em algoritmos de autômatos celulares e regras de transição que permite, a partir de probabilidades de transição, identificar a dinâmica de formação e evolução de padrões espaciais do fenômeno estudado (SOARES-FILHO et al., 2002, 2014; ROSSETTI, 2013; SCHRODER et al., 2016).

Esse software, a partir de um conjunto de dados de entrada em que são aplicados um número finito de operações, produz como saída um novo conjunto de dados. A modelagem é possível pela conexão de operadores que carregam e modificam os dados de entrada, como mapas, tabelas, matrizes e expressões matemáticas (SOARES-FILHO, 2015). O método empregado pelo programa é de autômatos celulares, podendo ainda utilizar dados de classes de solo, fertilidade, relevo, vegetação, hidrografia, além de outras informações georreferenciadas (covariáveis ambientais) e suas alterações ao longo do tempo. No modelo do programa é atribuído pesos para cada variável e a

correlação entre elas, sendo possível estabelecer prioridades e assim filtrar os cenários de modo a que se obtenham modelos que se adequem aos observados no campo ao longo do tempo. Tendo um modelo calibrado, com os dados observados é possível prever resultados futuros baseados nas variáveis presentes no modelo, e assim estipular o tempo como modificador do ambiente Vasconcelos (2013). Inúmeros modelos podem ser feitos baseados em dados observados, sendo possível para diversas áreas se adequar um modelo de simulação para o ambiente observado em cada na região.

OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Este trabalho teve como objetivo geral estudar a dinâmica de recuperação de área degradada de antigas minas de cassiteritas na FLONA do Jamari, considerando o repovoamento florestal nessas áreas.

Como objetivos específicos foi realizado:

- mapeamento da cobertura do solo nos anos de 2009 a 2015 utilizando imagens orbitais de alta resolução espacial ($\leq 1\text{m}$); e
- criação de cenários futuros considerando os períodos de 5, 10, 20 e 50 anos;
- avaliar o uso de um software de modelagem de desmatamento para modelar revegetação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Restauração de Áreas Degradadas

Classificar um ambiente como degradado é algo tênue e acaba por se tratar de um termo amplo. Um ecossistema que tenha sofrido alterações em consequência da perda ou redução da cobertura vegetal e das funções bióticas, tais como: perda de banco de sementes, diminuição de plântulas e rebrota, para Carpanezzi et al. (1990), seria classificado como sendo um ambiente degradado. Nesse contexto, qualquer alteração do meio natural seria classificada como sendo um ambiente degradado, seja provocado de forma natural, como a abertura de uma clareira pela queda de árvores, ou antrópica, provocado por uma queimada.

Para Brancalion (2015), a restauração de um ambiente natural modificado começa com a restauração ecológica, que é um conjunto de processos que visam auxiliar na recuperação de ecossistemas que foram degradados, danificados ou destruídos. O modo como as espécies se desenvolvem em ambiente degradado varia muito em função da capacidade dela se estabelecer e da disponibilidade de recursos. Em ambientes muito perturbados, como em cavas de mineração, a disponibilidade de nutrientes e água muitas vezes é escassa, mas conhecendo as interações ou o modo de fixação das espécies inseridas, é possível interpretar e prever o comportamento delas localmente.

A predição de como um ambiente perturbado estará no futuro é muito útil para o planejamento das ações e intervenções mais adequadas na paisagem a ser recuperada, sendo necessário obter modelos que melhor representem as complexas interações entre vegetais e as suas interações com o meio abiótico. Suganuma (2015) em estudo sobre restauração florestal e recolonização de espécies arbóreas na Mata Atlântica, aponta que as metas de restauração devem ser estabelecidas com base em atributos de ecossistemas que possam ser avaliados por meio de bons indicadores. Dale e Beyeler (2001) e Araújo (2014), apontam para isso também, que o uso de um único indicador ecológico não representa as complexas interações que existem em uma floresta ou plantio. Para esses autores, o uso de um conjunto pequeno de indicadores que sejam facilmente medidos é melhor, pois diminui erros e facilita observar as mudanças ao longo do tempo, sendo sensíveis ao estresse e respondam a perturbações de uma forma previsível, permitindo a previsão de alterações indesejáveis que podem

ser impedidas por ações de manejo. Para a restauração, os indicadores a serem utilizados para o monitoramento deve ser também bons substitutos para os serviços ecossistêmicos, tais como a proteção dos recursos hídricos e sequestro de carbono.

Para Chazdon (2007), em estudo sobre as complexas relações que existem entre as espécies vegetais no México e Costa Rica, utilizou dados obtidos a partir de cronossequências para construir modelos preditivos de mudanças da comunidade ao longo do tempo. Os autores ajustaram modelos contínuos e graduais e predeterminou atributos como a estrutura da floresta, a densidade de plântulas, riqueza de espécies e biomassa de forma satisfatória, demonstrando que em florestas mais complexas é necessário também observar outras interações.

2.2. Sensoriamento Remoto

Nas últimas décadas a difusão e o acesso a produtos do sensoriamento remoto vem aumentando, e sua utilização para o monitoramento e acompanhamento das modificações do uso e cobertura terrestre se multiplicando. As vantagens são inúmeras visto que não é necessário a presença *in loco* na maioria dos casos. A detecção das interações entre a radiação eletromagnética e os alvos da superfície terrestre, sem o contato direto ou a retirada do objeto de estudo do local, sendo o princípio básico da tecnologia do sensoriamento remoto (NOVO, 2010; ANDRADE, 2011; FLORENZANO, 2013).

O modo como a vegetação interage com as ondas eletromagnéticas da luz é indicada pelo quanto desta radiação ela reflete e absorve. A quantidade de radiação refletida é que permite identificar as cores e tonalidades e está diretamente correlacionado com a quantidade de água presente nas folhas e no tipo da planta (PONZONI, 2012).

Estudos como os de Lopes et al. (2010), Martins et al. (2012), Nunes et al. (2014), Candido et al. (2015) e Brito et al. (2016), são exemplos do emprego de técnicas de sensoriamento remoto para análise da dinâmica da cobertura vegetal e avaliação da degradação e modificação ambiental. Os autores determinaram a evolução e/ou identificaram passivos ambientais e modificações no ambiente utilizando cenas de satélites ambientais.

Mascarenhas et al. (2009) visando analisar a cobertura vegetal remanescente em uma bacia hidrográfica e assim identificar áreas prioritárias na fiscalização ambiental, utilizou cenas do CBERS II e pode verificar que nesta região muitas propriedades não tem o mínimo de vegetação florestal necessária para suprir as necessidades legais.

Carreiras et al. (2014) realizou análises de revegetação em áreas desmatadas ao longo de mais 30 anos utilizando como fonte de dados cenas do programa *Landsat*, visando compreender o aporte florestal e a regeneração em três regiões amazônicas. Os autores citam que o tipo de estudo foi apenas possível com a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto, pois há uma vasta disponibilidade de cenas com uma série temporal grande. O estudo concluiu que áreas que eram recorrentemente desmatadas tiveram menores índices de rebrota e que áreas no entorno de unidades de conservação sofriam menos desmatamento e melhores índices de rebrotas. Numata et al. (2009) também utilizou cenas do *Landsat* em uma série temporal de 21 anos estudou a dinâmica do efeito de borda e o aumento do desmatamento em uma região centro do estado de Rondonia, constatando que em áreas desmatadas a floresta tem 50% da borda desmatada nos primeiros 4 anos após a criação desta borda. A quantificação e o entendimento dessa dinâmica apenas é possível com o uso de ferramentas do sensoriamento remoto.

Feng (2017) utilizando cenas de satélites de alta resolução quantificou o avanço urbano sob a floresta e plantações. Os autores utilizando técnicas de composição de banda do infravermelho e bandas do visível buscaram analisar a dinâmica de ocupação humana na região de Altamira no Pará pela construção de uma hidrelétrica. Os autores concluíram que período de 5 anos a taxa de conversão de cobertura vegetal aumentou e cerca de 50% deste foi em decorrência da instalação da hidrelétrica e modificação urbana.

2.3. Modelagem e Predição em Ambientes Florestais

Os modelos de dinâmica espacial baseiam-se usualmente no paradigma de autômatos celulares (ou “cellular automata” - CA). Wolfram (1983) define autômatos celulares como idealizações matemáticas dos sistemas físicos, no qual o espaço e o

tempo são discretos, e os atributos assumem um conjunto de valores também discretos. Um autômato celular consiste de uma grade regular uniforme, com uma variável discreta em cada localidade (atributo ou estado da célula), que evolui em passos de tempo discretos. A vizinhança de uma célula é tipicamente formada pela própria célula em consideração e todas as demais células localizadas nas suas adjacências imediatas. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente, baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto pré-definido de regras locais (SOARES-FILHO, 2002).

Segundo Openshaw (2000), as simulações ou modelos computacionais geram informações qualitativas e quantitativas de fenômenos complexos da natureza. Desse modo, modelos de dinâmica espacial podem ser definidos como representações matemáticas de processos ou fenômenos do mundo real, nos quais o estado de uma dada localização na superfície terrestre muda em resposta a alterações nas suas forçantes ou variáveis explicativas (BURROUGH, 1998).

Em estudo sobre a sucessão vegetal ocorrida em uma região de mineração na Alemanha em 30 anos, Baasch (2010) realizou análises utilizando cadeias de Markov para prever o desenvolvimento vegetal ao longo dos anos. Esse método é um modelo estatístico que trabalha com matrizes que representam a probabilidade de mudança de estado de um determinado evento. Neste estudo na Alemanha, os autores tiveram bons resultados com o modelo, prevendo 79% da variância da mudança da cobertura do solo exposto.

A modelagem como citado é útil e pode ser utilizada como suporte na tomada de decisões. No estudo de Piontekowski (2012) realizado com o software Dinâmica-EGO sobre a influência da diminuição da área de reserva legal para o Estado do Acre, simulou-se para 40 anos o desmatamento para o Acre, utilizando três modelos de política que poderiam ser tomadas pelo Estado. Os autores apontaram que a metodologia e conceitos aplicados ao modelo com o Dinâmica-EGO mostraram-se capazes de representar o desmatamento de forma realista com o observado naquele estado, podendo, entretanto, ser utilizado para outras regiões do bioma amazônico.

Soares-Filho (2006) utilizou este software para prever o desmatamento para a floresta amazônica, utilizando 5 modelos de desenvolvimento ao longo do tempo, com isso pôde gerar ferramentas para auxiliar na tomada de decisões pelo poder público fiscalizador. Nesta pesquisa, os autores concluíram que o desmatamento estava diretamente ligado à presença de rodovias asfaltadas ou não, cortando os estados, ao longo das vias, o avanço em novas conversões era maior de que áreas sem vias terrestres.

Massoca (2013) em estudo da dinâmica espaço-temporal da vegetação em um município do Amazonas, utilizou o Dinâmica-EGO para calcular matrizes de transição da cobertura vegetal secundária em áreas de floresta primárias que foram desmatadas. Neste estudo foram utilizadas quatro classes de cobertura e dados de desmatamento do Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES), os autores citam que o modelador efetuou de forma coerente os cálculos de taxas de conversão da vegetação;

Soares-Filho e Dietzsch (2008) utilizando também o programa Dinâmica-EGO, calcularam pesos de evidência para os tipos de unidade de conservação de áreas protegidas para Amazônia Legal e diferenciaram as áreas protegidas contempladas pelo programa Áreas Protegidas da Amazônia (ARPA) das que não tinham esse suporte, entre período de 2002 e 2007. Os resultados obtidos permitiram observar o comportamento destas áreas protegidas quando inseridas em áreas de grande pressão antrópica (somente pela categoria de uso) e compará-los com os resultados obtidos para a Amazônia Legal.

Maeda (2011) em estudo da mudança de cobertura no Parque Nacional do Xingu utilizou três tipologias de cobertura, pastagem, cultivo agrícola e floresta. Nesta pesquisa os autores utilizaram cenas do landsat 5 nos anos de 2000 e 2005 e simularam paisagens para 10 anos, obtendo mapas com similaridade de 50% para uma resolução espacial de 1km.

Em um estudo sobre a modificação do uso e cobertura florestal em região do Rio Grande do Sul, Benedetti (2010) utilizou o Dinâmica-EGO para determinar as taxas de conversão na cobertura vegetal e prever a percentagem de cobertura para a região estudada com mapas de 2000 a 2008, utilizando Índice de Vegetação da Diferença

Normalizada (em inglês NDVI) para diferenciar e automatizar o mapeamento. Tendo resultados confiáveis para simulações até o ano de 2016, com índices de similaridade entre 91% e 76%, tendo resultados de que o desenvolvimento da vegetação seguindo as projeções observadas irá aumentar nos próximos anos.

Trabalhos semelhantes foram realizados utilizando a dinâmica da vegetação para estimar cenários futuros, visando estimar a emissão de carbono para a atmosfera pela expansão de uma rodovia no sul do estado do Acre. Vasconcelos et al (2013) utilizaram quatro cenários de ocorrência, dois com a expansão da rodovia e dois sem a construção desta. Utilizando dados de desmatamento do programa federal PRODES no período de 2004-2007 os autores fizeram calibração dos cenários de predição. O resultado da estimativa de emissão de carbono obtida pelos autores foi condizente com o observado e calculado pelo PRODES. Vitel e Fearnside (2009) modelaram a dinâmica de desmatamento de uma fronteira agrícola correlacionando com cenários de criação de UC no entorno do local de estudo ao sul da Amazônia, utilizando um complemento ao Dinâmica-EGO que tem algoritmos que interpretam pesos sociais como a presença de unidades de conservação no entorno.

Já Sonter (2014) em estudo sobre compensação dos impactos da mineração no Quadrilátero Ferrífero sob a Mata Atlântica, avaliou cinco diferentes cenários de mudança da cobertura vegetal, também utilizando o software Dinâmica-EGO para predizer quais seriam os resultados esperados em 10 anos de acordo com 10 anos de observações das mudanças de uso e cobertura da região estudada. Neste estudo, o modelo utilizado pelo software também obteve bons resultados, condizentes com o observado em campo.

Schroder et al. (2016) visando determinar a dinâmica de modificação da cobertura vegetal em uma bacia hidrográfica no Rio Grande do Sul utilizou ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Nesse estudo os autores utilizaram seis cenas para cobrir os anos de 1990 a 2014, empregando uma a cada 5 anos. Utilizando o Dinâmica-EGO para predizer o ambiente nos anos seguintes estimando a proporção florestada para o ano de 2018. Os autores obtiveram valores de similaridade de 53,7 % e 95,1 % para janelas de 1 x 1 e 11 x 11 respectivamente.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

A área de estudo foi a Floresta Nacional (FLONA) do Jamari, uma unidade de conservação de uso múltiplo. A FLONA está situada no estado de Rondônia criada em setembro de 1984, sendo administrada pelo Instituto Chico Mendes – ICMBio. Apresenta uma área aproximada de 223.086 ha, da qual 95% estão cobertas por Floresta Ombrófila Aberta (RADAMBRASIL, 1978). A topografia varia de altitudes de 50m a 300m sendo que 87,7% situa-se em cota inferior a 150m, de acordo com o MMA (2005). Está localizada a 120km da capital Porto Velho (RO), tendo 95% de sua área no município de Itapuã d’Oeste (figura 1).

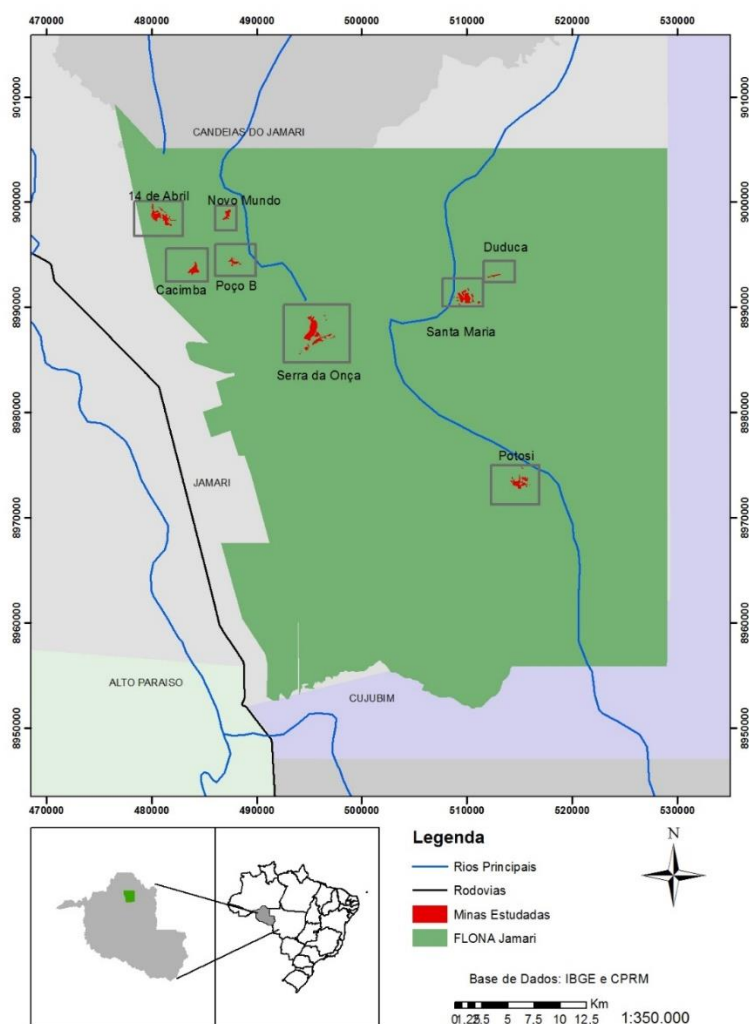


Figura 1 - Localização da FLONA Jamari, as minas em recuperação e municípios vizinhos.

Com um clima quente e úmido e temperatura média variando entre 24°e 26°C, apresentando uma precipitação pluvial anual de 2.550 mm, com a máximas variando de dezembro a março. A umidade relativa no local oscila em torno de 80% a 85%, havendo uma estação seca bem definida, com seu período mais crítico de julho a agosto.

Segundo Longo (2011) e Ribeiro (2005), nesta FLONA desde 1963 está instalado uma planta de extração de cassiterita, minério de estanho, sendo a mais antiga do Estado. A retirada do minério é feita a céu aberto e para separar este minério é necessário grande volume de água. Num processo mecânico e por diferença de massas, o solo é lavado, sobrando o minério no fundo de grandes peneiras. Para se lavar o minério, se realiza grandes escavações, que acabam por gerar fortes impactos sobre o solo, que é removido e também ao longo das vias de acesso a mina devido a passagem das máquinas nos processos que antecedem a extração e após a esta. Depois de retirado o minério, se formam grande montes de depósitos de materiais de rejeitos que na maioria dos casos são materiais inertes pois os horizontes A e B já foram eliminados, dificultando ainda mais o processo de recomposição e fixação de novos indivíduos.

A exploração de cassiterita foi inicialmente realizada de modo industrial na década de 1960 pela Companhia de Mineração de Jacundá e a Mibrasa, que pertencia a CESBRA. Posteriormente a empresa BRASCAN Brasil, pertencente ao grupo Canadense Brookfield, começou a minerar na região no início de 1974, quando comprou a Jacundá e em 1980 adquiriu a CESBRA. No começo da década de 90 a CESBRA iniciou um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), visando atender a passivos ambientais que a obrigavam a recuperar áreas de lavra desativadas. O resultado dessa primeira intervenção não foi satisfatório em função da elevada mortalidade das mudas plantadas. Assim no final de 1999 a CESBRA junto ao IBAMA dá início a um compromisso de ajustamento de conduta (CAC), com o objetivo de realizar as medidas necessárias para recompor as áreas por ela exploradas. Com isso foi realizado um novo PRAD e deste que foi realizado os levantamentos florísticos utilizados neste trabalho. Já em 2005 a CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) adquiriu a ERSA, que pertencia a CESBRA e a BRASCAN, dessa compra ficou a cargo da BRASCAN realizar as atividades de recuperação das minas exploradas por ela. Hoje a BRASCAN monitora 8 minas desativadas e apenas uma ainda está ativa na FLONA, sob o controle da CSN (BRASCAN, 2013).

As minas objeto deste estudo são: 14 de Abril, que ocupa uma área de 123,03 ha, Cacimba com 54,64 ha, Duduca com 13,03 ha, Novo Mundo com 31,33 ha, Poço B com 28,51 ha, Potosí com 88,57 ha, Santa Maria com 115,24 ha e Serra da Onça com 218,13 ha. As áreas das minas têm diferentes níveis de degradação de acordo com o tipo de exploração sofrida. Existem taludes para estradas e acessos, piso de lavra que é a própria área de exploração e áreas de deposição de rejeito que podem ser secos e úmidos ou rejeitos capeados, que são áreas que podem ser secas ou úmidas, mas que receberam uma cobertura de solo mais rico por cima. Longo (2005) cita que nas áreas sob responsabilidade da BRASCAN, aquelas com deposição de rejeito seco, alagadas e as áreas caracterizadas como de piso de lavra são as que mais demandam tempo, investimentos e atenção no momento de se implementar o PRAD, ocupando as maiores áreas degradadas dentro desta FLONA.

3.2. Levantamento do Uso do Solo

Os mapas de cobertura do solo foram vetorizados manualmente em tela do computador utilizando o programa de geoprocessamento ArcGis 10,2. Foi utilizado cenas dos satélites Ikonos 2 com 1 m de resolução espacial, para o uso e cobertura do ano de 2009, uma cena do satélite WorldView-2 com resolução de 50 cm para o ano de 2011 e cenas do satélite Plêiades que tem 50 cm de resolução espacial, para os anos de 2013 e 2015. Os mapas foram vetorizados em uma escala de 1:1000 para melhor distinguir as nuances e modificações nas feições da cobertura das 8 minas para os 6 anos de estudo. As características dos satélites são vistas na tabela 1.

Tabela 1. Características dos sensores dos satélites utilizados.

	Ikonos 2 (2009)	WorldView-2 (2011)	Plêiades (2013 e 2015)
Bandas espectrais	450-900 nm (Pan) 450-520 nm (Azul) 520-600 nm (Verde) 630-690 nm (Vermelho) 760-900 nm (Infra. Próximo)	450-800 nm (Pan) 450-510 nm (Azul) 510-580 nm (Verde) 630-690 nm (Vermelho) 770-895 nm (Infra. Próximo)	480-830 nm (Pan) 430-550 nm (Azul) 490-610 nm (Verde) 600-720 nm (Vermelho) 750-890 nm (Infra. Próximo)
Resolução espacial	Pan: 1 m Ms: 4 m	Pan: 0,5 m Ms (A,V,V,IV): 2,0 m	Pan: 0,5 m Ms (A,V,V,IV): 2,0 m

3.2.1. Classes de Cobertura

Para a vetorização das cenas dos 4 anos de estudo foram identificados seis tipos de cobertura: *solo exposto*, *campo sujo*, *vegetação rala*, *vegetação intermediária*, *vegetação densa* e *plantio de mudas*. Partindo do pressuposto ideal de que o desenvolvimento do recobrimento do solo se deem na ordem de *campo sujo* até *vegetação densa*, que é tido como o mais similar à floresta amazônica. As tipologias utilizadas na vetorização foram adaptadas do manual técnico de uso da terra (IBGE, 2013). A identificação adotada levava em consideração percentagem de solo exposto e porte da vegetação se presente:

- *Solo exposto*: essa tipologia foi atribuída quando se identificava a cobertura do solo sem cobertura vegetal (solo nu), se identificado algum tipo de vegetação se essa fosse espaçada e pouco representativo menor que 20% da área delimitada, na figura 2 é mostrado exemplo da classificação feita com base na imagem obtida com o sensor abordo do satélite worldview-2 no ano de 2013, vista a esquerda e a classe fotografada em campo a direita;



Figura 2 – Exemplo classificação classe de *solo exposto*.

- *Campo sujo*: quando a área apresenta qualquer tipo de cobertura vegetal cobrindo o solo em sua totalidade, mas que o tipo de vegetação fosse de porte baixo, com domínio de plantas herbácea, gramínea ou arbustiva, mesmo que tivesse alguma espécie arbórea isolada, na figura 3 é mostrado exemplo da classificação feita com base na imagem do worldview-2, a esquerda e a classe fotografada em campo;

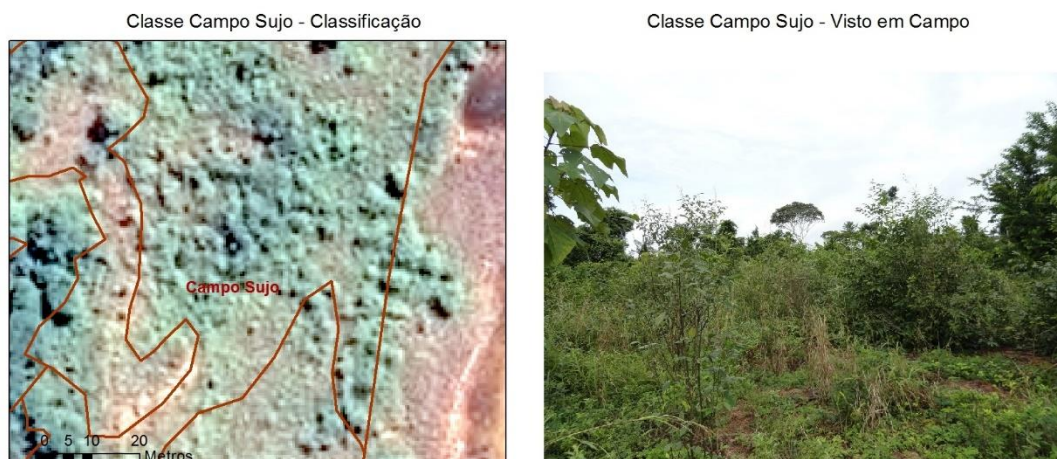


Figura 3 – Exemplo classificação classe de *campo sujo*.

- *Vegetação rala*: atribuído esse tipo de cobertura quando o estágio de recobrimento do solo é posterior a classe de campo sujo e quando a vegetação ainda tem predominância de características de porte arbóreo, espaçado com mais de 40% da área delimitada ainda com presença de espécies herbáceas e arbustivas, na figura 4 é mostrado exemplo da classificação feita com base na imagem do worldview-2 a esquerda e a classe fotografada em campo;

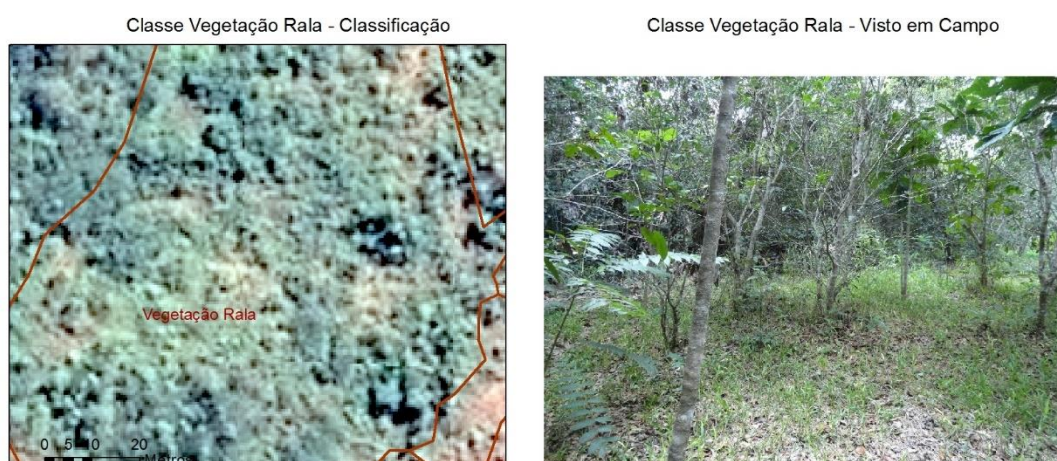


Figura 4 – Exemplo classificação classe de *vegetação rala*.

- *Vegetação intermediária*: estágio de recobrimento do solo predominante de espécies arbóreas mas o dossel não é fechado e homogêneo arbustivas, na figura 5 é mostrado exemplo da classificação feita com base na imagem do worldview-2 a esquerda e a classe fotografada em campo;



Figura 5 – Exemplo classificação classe de *vegetação intermediária*.

- *Vegetação densa*: estágio final quando se tem a presença predominantemente de espécies arbóreas e o dossel fosse relativamente homogêneo e fechado, esta classe é o último estágio da classificação, sendo o mais similar à Floresta Amazônica, na figura 6 é mostrado exemplo da classificação feita com base na imagem do worldview-2 a esquerda e a classe fotografada em campo.



Figura 6 – Exemplo classificação classe de *vegetação densa*.

- *Plantio de mudas*: era atribuído às áreas onde se teve intervenção humana visando acelerar o recobrimento e onde houve métodos de plantio com mecanização e acompanhamento. Podendo ocorrer em qualquer nível de recobrimento vegetal, mas em geral foi implementado em áreas descobertas, com solo exposto ou campo sujo, visando enriquecimento e recobrir o solo, na figura 7 é mostrado exemplo da

classificação feita com base na imagem do worldview-2 a esquerda e a classe fotografada em campo.



Figura 7 – Exemplo classificação classe de plantio de mudas.

3.3. Modelador Dinâmica-EGO

O Dinâmica-EGO utiliza apenas arquivos no formato raster e estes devem estar em formato de matrizes com mesmo número de colunas e linhas. Dessa forma, foi necessária a adequação de todos os mapas gerados a essa exigência. Assim foram obtidas matrizes de células (pixels) formadas por 3603 colunas e 2713 linhas, tendo os pixels de 10 metros e todos os dados foram convertidos também no Datum Sirgas 2000, sendo possível carregar, processar e manipular os dados dentro do programa.

3.4. Variáveis Locais

Para melhor representar a área de estudo foram utilizados dados do projeto ALOS-PALSAR, obtidos gratuitamente no site <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>. Esses dados foram importados para o ArcMap e obtido um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 12,5 m. Com o arquivo resultante foi calculado as percentagens de declividade do terreno utilizando o comando *Slope (Surface)* do programa ArcGis 10,2.

A radiação solar anual também foi calculada o usando a ferramenta *Area Solar Surface* presente no arctoolbox do ArcMap. Para que pudesse ser importada no Dinâmica-EGO usando o *MapAlgebra*, foi modificada a proporção dos valores de cada

pixel gerado dos dados de radiação passando para valores inteiros e dividindo por 10000 para que os valores estivessem com apenas três casas decimais e pudessem ser melhor manipulados e importados nos modelos de simulação, assim foram obtidos arquivos raster mais leves e representativos.

3.5. Influência no Tipo de Substrato

Neste trabalho se mapeou os tipos de substratos presentes nas áreas em recuperação das antigas minas e estes foram analisados para inferir sobre a influência do substrato no desenvolvimento dos plantios, comparando desenvolvimento das espécies arbóreas e gramínea para os quatro anos de estudo. Foi realizado o levantamento e análise da dinâmica da vegetação ao longo do tempo utilizando vetores classificados no ArcGis, além de resultados de inventários contínuos que já são realizados anualmente em parcelas fixas. A espacialização dos substratos é apresentada na Figura 8.

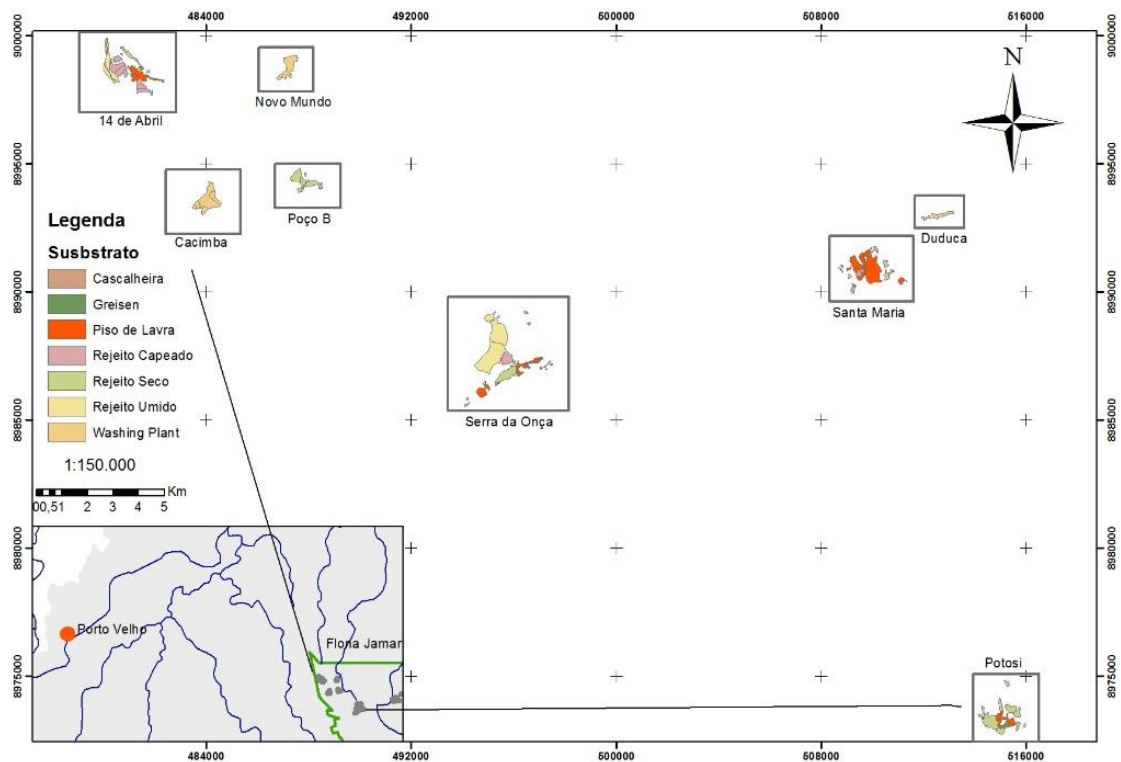


Figura 8 - Localização das Minas e substratos mapeados.

3.5.1. Piso de lavra (PL)

A abertura de cavas para a exploração de cassiterita exige a exposição de encostas e a confecção de bermas. A declividade das encostas e largura das bermas, tradicionalmente, é determinada em função das características do material, do processo de abertura da cava, da necessidade de vias de acesso e do volume de minério a ser explorado. Por sua vez, esse volume depende da pureza do minério e dos aspectos econômicos do processo (valor de mercado da cassiterita, relação estéril/minério, custos de extração, de recalque de águas, de beneficiamento etc.).

Na medida em que a cava se aprofunda, exige-se maior exposição de encostas e maior área de bermas. Esse tipo de substrato está presente nos talhões das minas 14 de Abril, Potosí, Santa Maria e Serra da Onça.

3.5.2. Área de deposição de rejeito:

Seco e úmido (Su):

Em áreas de lavra a céu aberto, a retirada do minério sem o retorno do estéril ou mesmo dos horizontes superficiais (preenchimento da cava) conduz a um substrato remanescente formado por uma massa heterogênea de material. Essas áreas são preenchidas com sedimentos, drenadas ou parcialmente drenadas, com granulometria variável, sujeitas à inundação, acarretando problemas de sustentação física do terreno, dificultando ou impossibilitando a mecanização. As características desse substrato dependem de propriedades físicas e geoquímicas da rocha que deu origem a esses resíduos, mas, geralmente, eles são muito pobres e desprovidos de matéria orgânica, dificultando o desenvolvimento vegetal.

Rejeito seco (Rs):

Encontra-se próximo à barragem de contenção de rejeitos, apresenta granulometria com partículas maiores, principalmente areia, pouca ou nenhuma estruturação, baixa ou baixíssima fertilidade natural e algumas vezes dificuldades de mecanização, pois o material apresenta-se muito solto. Apresentam também excessiva capacidade de drenagem o que torna o material com baixa capacidade de retenção de água.

Esse tipo de substrato está presente nos talhões das minas 14 de Abril, Poço B, Potosi, Santa Maria e Serra da Onça.

Rejeito úmido (Ru):

Apresenta-se mais afastado da barragem de contenção de rejeitos, normalmente próximo a cursos d'água. Sua granulometria é bastante fina com predominância de partículas de argila. Em função de sua proximidade de cursos d'água podem permanecer parte do ano alagados, sendo necessário para sua utilização no plano de recuperação de áreas degradadas um estudo prévio de sua drenagem. O tráfego de máquinas é bastante dificultado pela presença constante de excesso de umidade.

Esse tipo de substrato está presente nos talhões das minas 14 de Abril, Santa Maria e Serra da Onça.

Rejeito capeado (Rc):

São áreas de deposição de rejeito, podendo ser seco ou úmido, que sofreram um recobrimento com uma camada de solo, em algum momento, por ações da empresa mineradora. Quando observados em perfis apresentam indícios de formação de um pseudo horizonte A.

Esse tipo de substrato está presente nos talhões das minas 14 de Abril e Santa Maria.

Nas áreas de mineração da CESBRA, os locais de deposição de rejeito secos e alagados e as áreas denominadas de piso de lavra ocupam a maior porcentagem das áreas degradadas, necessitando assim, de uma atenção especial no planejamento da revegetação e acompanhamento dos plantios.

Cascalheira:

São áreas de deposição de rejeito com granulometria alta quase em sua maioria formado por cascalho, ficando difícil sua recuperação, pois não há solo para reter umidade e nutrientes.

Esse tipo de substrato ocorre nos talhões das minas 14 de Abril, Poço B, Santa Maria e Serra da Onça.

3.5.3. Área do tipo *Whashing Plant* (WP)

São áreas que ocorrem em minas com um grau de tecnologia elevado, pois é um modo de extração de minério que é feito de forma a no momento que a máquina de mineração realizar a dragagem do minério e separação do material solo do minério é feita de forma rápida e sendo o solo devolvido para o local de acordo com o avanço da máquina. Nesse tipo de extração o solo não é retirado para um novo local ficando assim disponível e com banco de sementes viáveis. O tipo de extração *Whashing Plant* é o que menos causa diminuição da resiliência local, sendo possível restaurar o ambiente com menos gastos e tempo.

Esse tipo de substrato está presente nos talhões das minas Cacimba, Duduca e Novo Mundo.

3.6. Criação de Cenários

A criação de cenários visa modelar sistemas que simulem o ambiente de forma que seja confiável. Visam auxiliar o entendimento dos mecanismos de desenvolvimento de sistemas ambientais, podendo assim determinar como eles evoluem diante de diferentes quadros socioeconômicos, políticos e ambientais (RODRIGUES et al., 2007). A criação de cenários se caracteriza como um meio de encorajar a produção de indicadores quantitativos que possam ser utilizados pelo governo e pela sociedade, através de uma avaliação dos impactos socioambientais (GEOMA, 2005).

Os mapas e processamentos dos modelos de predição foram realizados no software Dinâmica-EGO 3.0.17 que faz parte de um projeto que visa representar mudanças na cobertura do solo para a Amazônia e é de autoria do laboratório de Sensoriamento Remoto da UFMG. Na figura 9 é mostrado um fluxograma das entradas e variáveis que podem ser utilizadas. Nesse programa é possível treina-lo para melhor correlacionar as entradas das variáveis, dando maior ou menor peso de evidencia a cada variável carregada ao modelo.

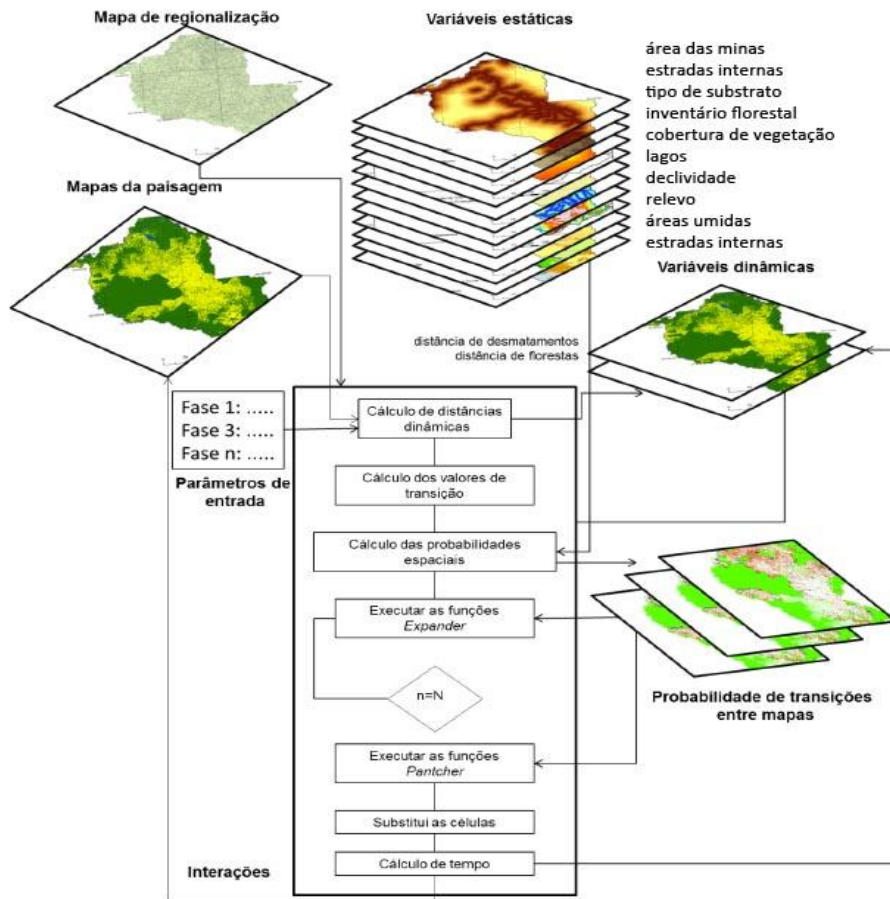


Figura 9 – Fluxograma do programa Dinâmica-EGO. Adaptado de Soares-Filho (2002).

Para a criação dos modelos de dinâmica da mudança de cobertura vegetal das minas estudadas se utilizou os mapas de cobertura vetorizados manualmente em formato *shapefile*, que foram convertidos em matrizes em formato raster, pois o programa processa apenas este tipo de arquivo (Figura 10).

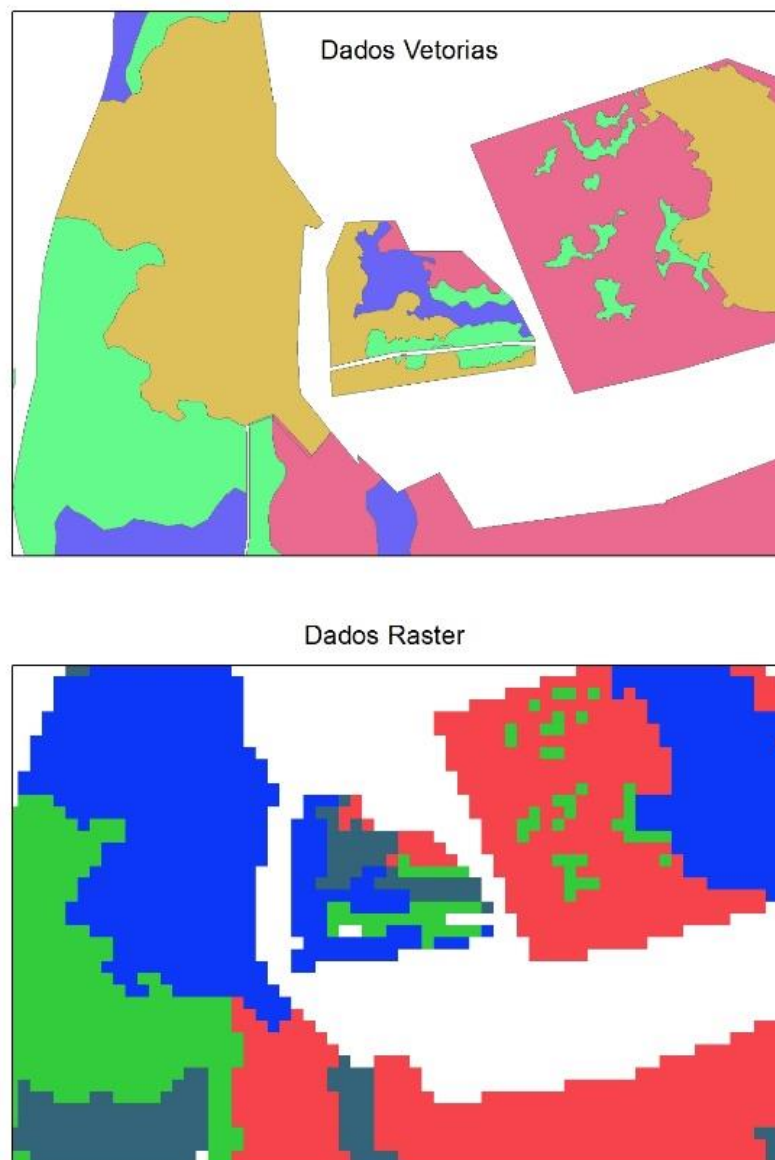


Figura 10 – Detalhes da Mina 14 de Abril em formato vetor (*shape*) e *raster*.

A criação dos modelos foi realizada por meio de entidades denominadas *Portos*, que se ligam a outros *Portos* de outros operadores (nome dado a um processo que realiza uma dada ação específica) compatíveis. Certas variáveis dos operadores podem ser editadas para que os dados e a interação entre as variáveis sejam realizadas ou calculadas (RODRIGUES, 2007; Manual Dinâmica-EGO, 2009). Para simular o efeito do recobrimento de vegetação, que é neste caso a transformação da tipologia de solo exposto em outra tipologia tal como *vegetação rala* chegando até a tipologia *vegetação densa*, foi necessário atribuir pesos de evidência para as variáveis estudadas, tipo de

substrato, declividade, pluviosidade anual, radiação solar e tipo de vegetação no $t-1$ da célula e a influência do tipo de uso/vegetação dos vizinhos.

O programa realizou análises bayesiana de pesos de evidência e calculou as probabilidades *a posteriori* de mudança de uso da terra, considerando a distribuição espacial do conjunto de variáveis, (VITEL, 2009; SCHRODER et.al, 2016). Os pesos de evidencia representam a influência de cada variável nas probabilidades espaciais de uma transição de um estado i para j , sendo calculados pelas equações:

$$P(D|A) = \frac{P(D \cap A)}{P(A)} \quad (1)$$

$$P(A|D) = \frac{P(A \cap D)}{P(D)} \quad (2)$$

$$P(A \cap D) = P(A|D) \times P(D) \quad (3)$$

Substituindo na equação 1 em 3

$$P(D|A) = P(D) \times \frac{P(A|D)}{P(A)} \quad (4)$$

Da mesma maneira, considerando o não-evento D, \bar{D} , obtém-se:

$$P(\bar{D}|A) = P(\bar{D}) \times \frac{P(A|\bar{D})}{P(A)} \quad (5)$$

$$O(D|A) = O(D) \times \frac{P(A|D)}{P(A|\bar{D})} \quad (6)$$

$$\log O(D|A) = \log O(D) + \log \frac{P(A|D)}{P(A|\bar{D})} \quad (7)$$

$$\log O(D|A) = \log O(D) + W^+ \quad (8)$$

$$\log O(D|A) = \log O(D) + \sum_{t=1}^n W_i^+ \quad (9)$$

Sendo que na equação $O(D)$ e $O(D|A)$ são as razões de chances, respectivamente, de ocorrer *a priori* o evento D dado um padrão espacial A W^+ é, portanto, o peso de evidencias de ocorrer um evento D , dado um padrão espacial A . Quando considerados vários padrões espaciais A_i , os pesos de evidencia relacionados a esses padrões são somados, conforme a equação. Os cálculos de pesos de evidencia são calculados por um

modelo interno do próprio Dinâmica-EGO, seguindo um fluxograma apresentado na Figura 11.

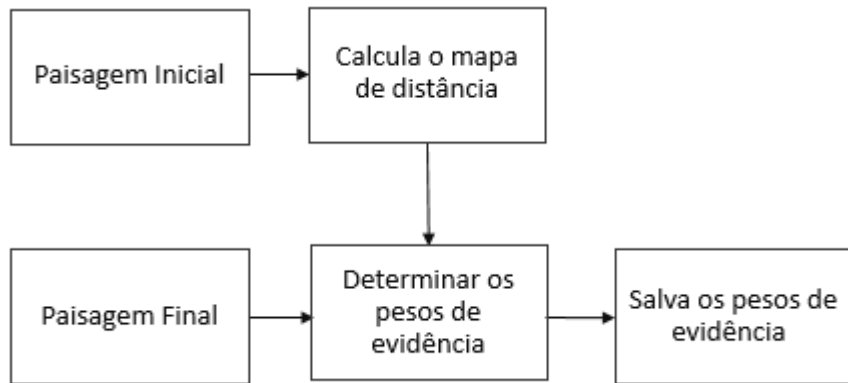


Figura 11 – Fluxograma de cálculo de pesos de evidência do programa.

A tipologia plantio de mudas foi retirada dos modelos de cenários futuros e substituída pela classe mais próxima de modo geral campo sujo ou solo exposto, pois a modelagem e treinamento do programa não interpretou de forma satisfatória essa classe. Visto que é uma classe totalmente dependente da ação humana e que ocorre de forma não natural nas áreas das minas.

Visando simular uma estrutura da paisagem, foi necessário montar um modelo que estimasse a matriz de transição entre os anos estudados. O Dinâmica EGO possui um operador específico para esse tipo de cálculo, sendo necessário apenas carregar o mapa no estágio inicial (ano 1) e o final (ano n), como mostrado no fluxograma da Figura 12, como resultado se obtém dois arquivos em formato de tabelas CSV, um com a transição em múltiplos passos (2 anos nesse caso) e outro em passo único, que são as taxas de conversão e quais tipologias se modificaram entre as paisagens iniciais e finais.

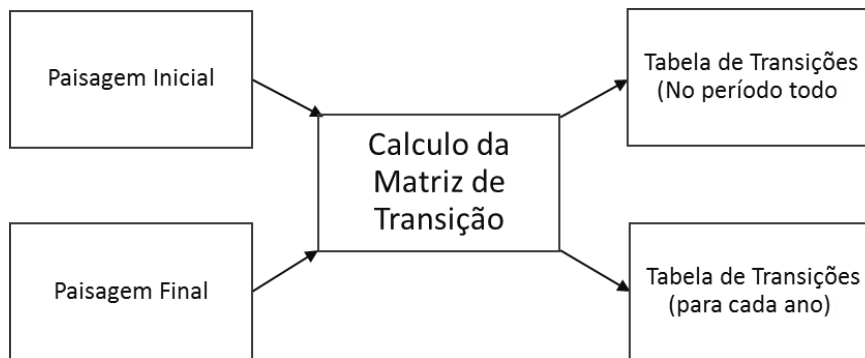


Figura 12 – Modelo de cálculo da matriz de transição entre os pares de anos.

Para simular a estrutura da paisagem, foi necessário elaborar um modelo que calcula as probabilidades de cada transição entre as diferentes coberturas de solo classificados ocorrer (pesos de evidência), o conjunto de operadores examina os mapas de probabilidade gerados a cada iteração e é limitado por valores de faixas de ocorrência para cada mudança de interesse, especificado pelo utilizador (Manual Dinâmica-EGO, 2015). Os operadores calcularam a taxa média de conversão ou passagem de uma tipologia de cobertura para a próxima, onde para cada transição se adiciona as variáveis que influenciam nesta dada conversão. A matriz de transição de cada variável se dá pela soma de porcentagens pré-fixadas do valor das variáveis em períodos anteriores, assim correlaciona as mudanças observadas com as variáveis adicionadas, calculando o índice de significância da variável e em qual faixa essa é mais significativa, sendo gerado um arquivo em formato de tabela (pesos.dcf) específico para o software. Na Figura 13 o modelo criado para o período de 2011-2013 é mostrado resumidamente.

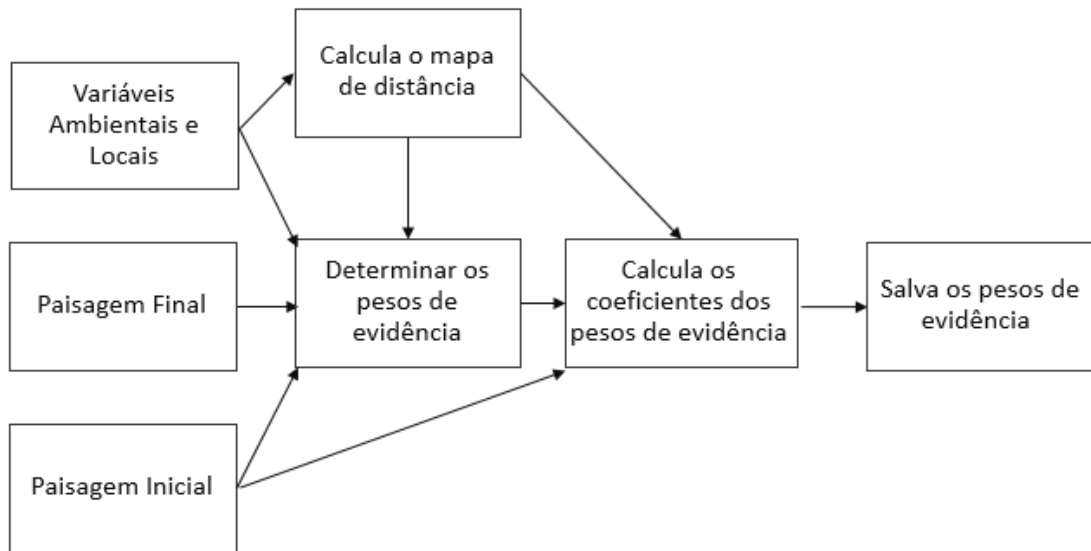


Figura 13 – Modelo de cálculo dos pesos de evidencia das variáveis para cada uma das transições para a passagem do ano inicial para o final.

Os resultados do cálculo dos pesos de evidência e significância das variáveis utilizadas estão disponíveis na Tabela 2. Após o cálculo das faixas de distância e dos pesos de evidência para os três pares de anos, foram verificadas as associações ou dependência espacial entre as variáveis pertencentes a uma mesma transição, que contem para cada transição todas as combinações possíveis entre pares de variáveis e os respectivos valores do peso dos intervalos. Para isso foi preciso definir esses parâmetros para cada mancha de transição no período. A rotina de cálculo também foi feita para o período de 2013-2015 visando um modelador que melhor representasse as modificações observadas.

Dados de pluviosidade média anual, tipo de substrato presente no solo, curvatura do relevo e radiação solar foram utilizados para auxiliarem a montagem dos modelos. Essa rotina de criação de modelos e modificação foi feita para os três pares de anos, visando encontrar o melhor modelo para ser utilizado na simulação ou predição do desenvolvimento da paisagem das minas nos anos futuros. Na figura 14 é visto o modelo de simulação para o ano de 2015.

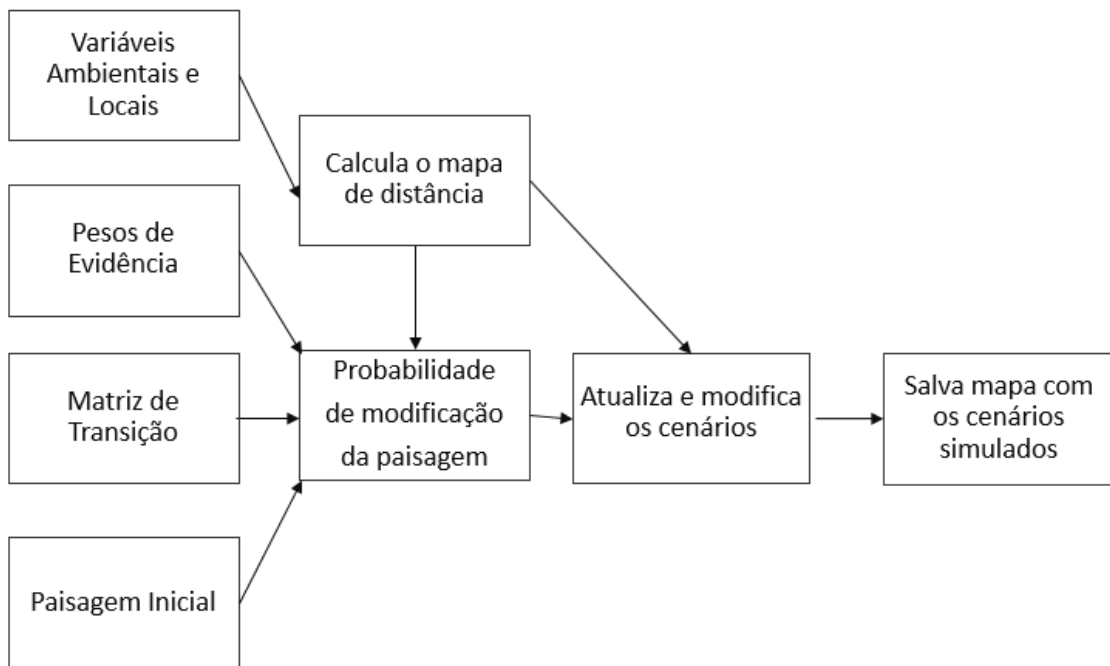


Figura 14– Modelo de simulação uma paisagem futura para a partir da observação de uma paisagem inicial.

A simulação de paisagens futuras é calculada e predita com o auxílio de operadores que aumentam e modificam a paisagem (*expander*) e criam novas manchas (*Patcher*) baseados nas probabilidades de ocorrências já calculados. O *expander* considera que as transições de tipologia ocorrem com base na célula vizinha, podendo aumentar ou diminuir ambos com base na paisagem inicial. Já o *patcher* é responsável pelo aparecimento de novas manchas de células em áreas com maior probabilidade de transição (SOARES et al., 2006, NASCIMENTO et al. 2013 e XIMENES et al. 2008). As taxas de aumento e criação de novas manchas é realizada de acordo com os valores inseridos pelo utilizador no operador denominado *Update Landscape (Patcher)*, que é responsável pela criação e expansão das manchas.

Visando preencher os valores e taxas para cada uma das transições estudadas de forma condizente com o observado nos mapas vetorizados foi criado um modelo para calcular o tamanho médio das manchas convertidas para cada tipologia e o seu respectivo desvio padrão do tamanho da mancha, na Figura 15 é mostrado o modelo de inserção e os operadores utilizados de forma reduzida.

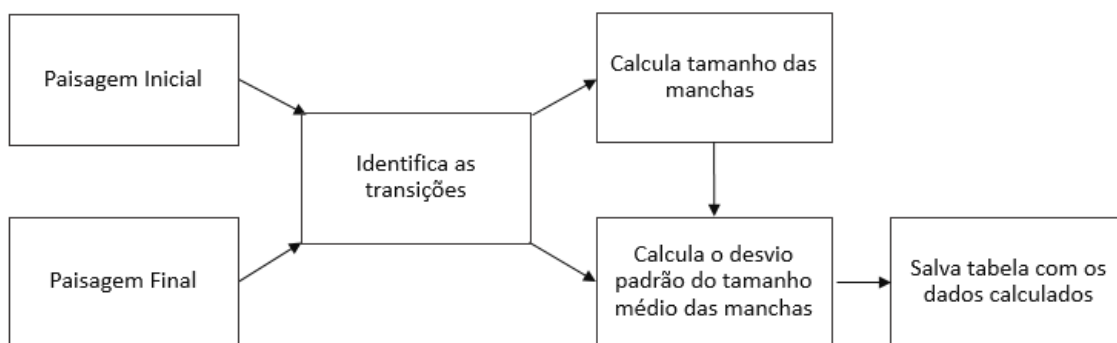


Figura 15 – Modelo de cálculo do tamanho das manchas e desvio padrão para cada transição entre os pares de anos.

A importância desse cálculo é que estes valores são passados em hectares, por isso, dependendo do tamanho da resolução da célula (pixel), um conjunto com um certo número de células vai ser formado e se o mapa inicial tem muitas células a serem convertidas no $t+1$, e os valores de preenchidos no patch forem muito altos ocorrerá uma superestimação do tamanho de novas manchas e expansão das existentes, pois na simulação o crescimento e conversão pelo operador irá variar de acordo com uma distribuição normal.

Com isso foi possível estimar o desenvolvimento da vegetação e a dinâmica de mudança e cobertura do solo para os próximos 50 anos nas áreas das minas sob o plano de recuperação de áreas degradadas. Foram gerados também mapas preditivos para os períodos de 5, 10, 20 e 50 anos.

3.7. Validação dos Modelos

O Dinamica-EGO possui um operador que é utilizado no processo de validação das paisagens geradas. Esse operador é baseado no método da lógica *Fuzzy* (SOARES-FILHO et al., 2015) que avalia os acertos de transições ocorridas na vizinhança das células modificadas. Essa validação utiliza uma função de decaimento constante com janelas de tamanhos variáveis de 1x1 a 11x11 pixels, sendo que o tamanho é estipulado pelo operador. Este método foi proposto por Hagen (2003) que demonstra dependência de

modificações de estados da célula com a vizinhança local, metodologia esquematizada na Figura 16.

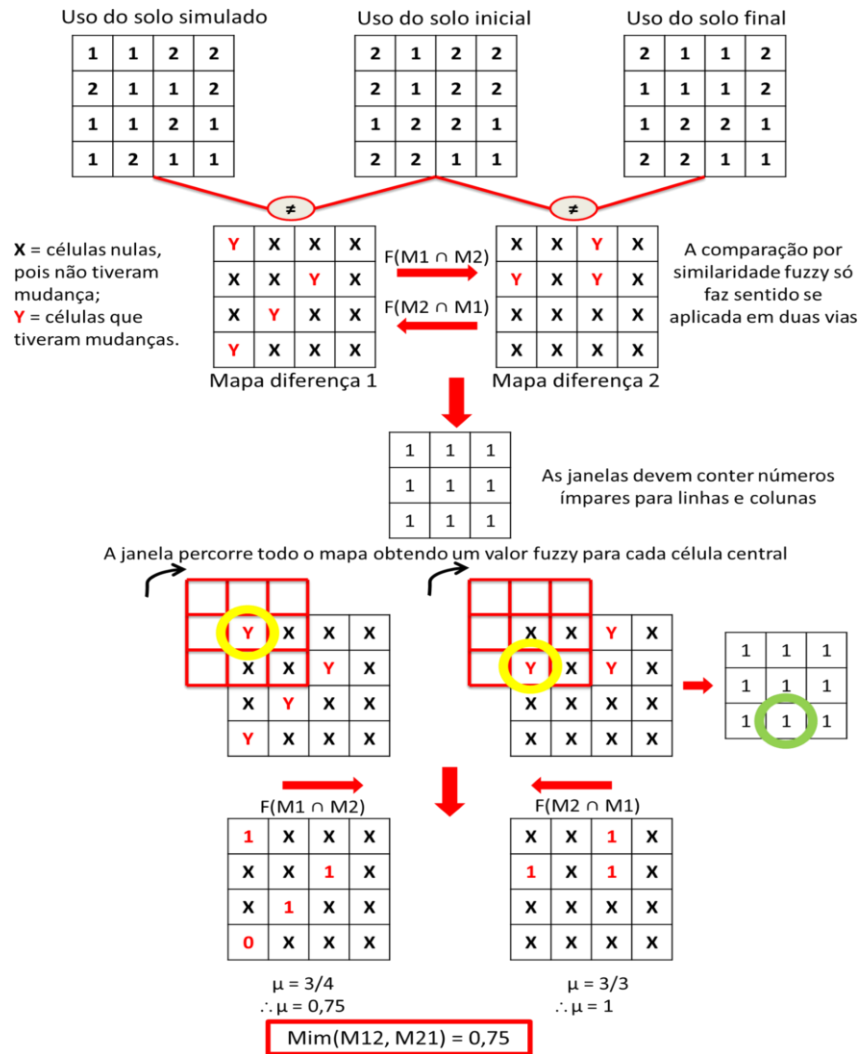


Figura 16 - Método de comparação Fuzzy usando mapa de diferenças e uma função de decaimento constante. Fonte: Piontekowski, (2014).

Este tipo de validação é muito utilizado por diversos autores tais como Kawashima (2016), Schroder (2016), Souza (2014), Macedo(2013), Piontekowski (2012) e Vitel e Fearnside (2009), Soares-Filho (2008) e Ximenes (2008). Sendo um validador similar ao índice *Kappa* mas sem o uso de amostras de treinamento pois os mapas são tratados como matrizes pelo próprio Dinamica-EGO e a análise é feita célula a célula, onde a comparação é realizada entre janelas com uma área finita determinado pelo operador.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Aporte da Vegetação

Diversas ações foram realizadas nas áreas mineradas direcionadas pelo Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) pela empresa responsável, visando a recuperação vegetal e das funções ecológicas locais. Vários fatores influenciam no desenvolvimento vegetal nessas áreas, em especial o tipo de substrato, dinamismo e disponibilidade de água para a vegetação arbórea local, além do uso de diferentes técnicas de recuperação, como o uso de topsoil e de espécies adaptadas aquelas condições.

Os resultados obtidos das matrizes de transição implementadas no Dinâmica-EGO, para os três pares de anos estudados, refletem essas ações e demonstram as transformações ocorridas nas áreas. Os quantitativos foram calculados e exportados para tabelas de Excel para melhor serem organizados e interpretados. Os resultados podem ser observados na Tabela 1A (período de 2009 a 2011), Tabela 2A (período de 2011 a 2013) e Tabela 3A (período de 2013 a 2015), em anexo.

Com os resultados calculados com os três modelos de matriz de transição, foi possível compreender as taxas de conversão geral da cobertura do solo no período de 2009 para 2011, de 2011 para 2013 e de 2013 para 2015 que está sumarizada na Figura 17.

A iteração da matriz de transição do programa Dinâmica-EGO calculou a passagem de cada uma das tipologias presentes nos mapas e a matriz resultante contém as taxas de transformações que ocorreram dentro do espaço de tempo entre o mapa inicial e final. Nascimento et al. (2013) e Massoca et al. (2013) fizeram trabalhos semelhantes, usando a mesma metodologia empregada de matrizes de transição para quantificar as taxas de conversão de cobertura vegetal, com tipologias de cobertura classificadas para um período de 4 anos de observação, ambos realizados no bioma Amazônico.

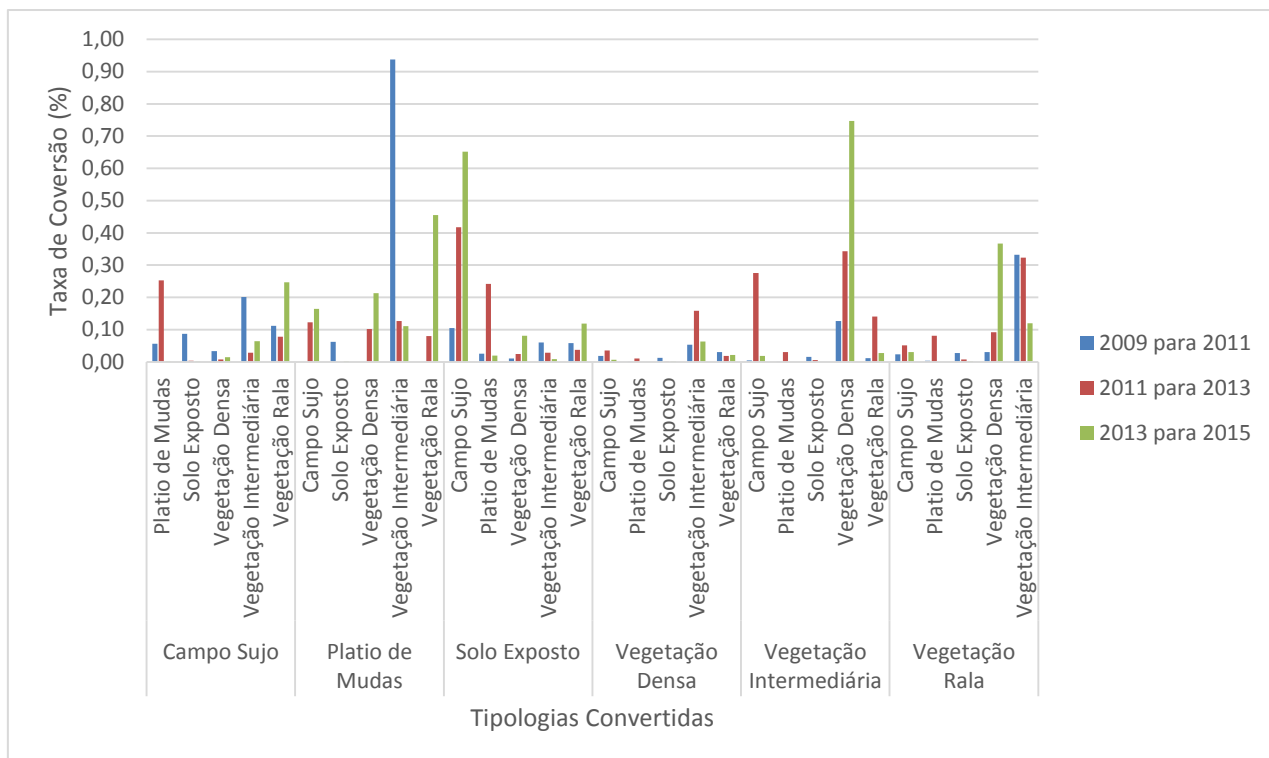


Figura 17 – Taxas de conversão para os pares de anos nos anos de 2009 a 2015, dinâmica da conversão das tipologias identificadas nas minas para os 4 anos de estudo.

Em cada período bianual considerado, as transformações das classes de cobertura do solo retratam uma evolução da vegetação em padrões distintos. Na primeira etapa (2009-2011), a maior taxa de modificações da cobertura foi observada entre *plantio de mudas* para *vegetação intermediária*, que apresentou uma conversão de 0,94, o que demonstra que 94% das áreas classificadas como plantio dois anos depois eram já tidas como *vegetação intermediária*, demonstrando que o plantio de mudas dá um impulso e acelera de forma rápida o desenvolvimento vegetal no local. Já no segundo período (2011-2013), as maiores taxas de conversão foram de solo exposto para campo sujo (0,42) e de vegetação intermediária para vegetação densa (0,34). Enquanto que para o período seguinte (2013-2015), teve destaque a conversão de solo exposto para campo sujo (0,65).

Os dados calculados pela matriz de transição mostram que para *solo exposto* entre 2009 e 2011 a taxa de conversão para *campo sujo* foi de 0,10 já para o período seguinte, de 2011 para 2013, foi de 0,42 e no período final, entre 2013 e 2015, a taxa foi de 0,65, um crescimento gradativo e com resultados também similares para as taxas de

conversão de campo sujo para *vegetação rala*, tendo os valores de 0,11, 0,08 e 0,25 respectivamente.

Já para as taxas de conversão de *vegetação rala* para *vegetação intermediária* ocorreu uma estabilização nos dois primeiros períodos com valores de 0,33 (2009 a 2011) e 0,32 (2011 a 2013) e no último período (2013-2015) foi de 0,12, isso é observado pois as áreas com *solo exposto* reduziram ao longo do período estudado assim como o campo sujo em função da evolução da cobertura vegetal, mas essas áreas de campo sujo até o momento não tinham ganhado porte para serem classificadas como *vegetação rala*. As taxas de conversão de *vegetação intermediária* para o estágio final, representado pela *vegetação densa*, também tiveram um aumento gradual com valores de 0,13; 0,34, e 0,75, demonstrando que nas minas ocorre de uma cobertura vegetal evoluir e mudar de classe e a classe seguinte igualmente também evolui para a próxima etapa do desenvolvimento arboreo.

Visando melhor entender a passagem e evolução de cada mina ao longo dos anos, as áreas das tipologias delimitadas para cada uma foram calculadas no ArcMap em hectares e importadas para o programa Excel e analisadas separadamente.

Com a vetorização do uso e cobertura das minas estudadas foi possível observar que para a mina 14 de Abril (Figura 18) houve forte diminuição da tipologia de *solo exposto*, que foi convertido para *vegetação rala* e *intermediária*. Demonstrando que o *input* de plantio de mudas surtiu efeito na fixação e colonização da vegetação, o que ocorreu principalmente nas áreas com rejeito úmido. De acordo com o relatório florístico (BRASCAN, 2015) os plantios nessa área têm idade variando entre 7 a 18 anos. Para o ano de 2015, aproximadamente 60% da mina possuía vegetação classificada como densa, com uma área basal média entre os talhões de $10,61 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ (variando entre os talhões de $6,9$ a $14,67 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$) (BRASCAN, 2015). Para a FLONA Jamari o valor médio da área basal é de $15 \pm 4 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ (BRASCAN, 2015) demonstrando que o desenvolvimento e recobrimento arbóreo está se aproximando do padrão local.

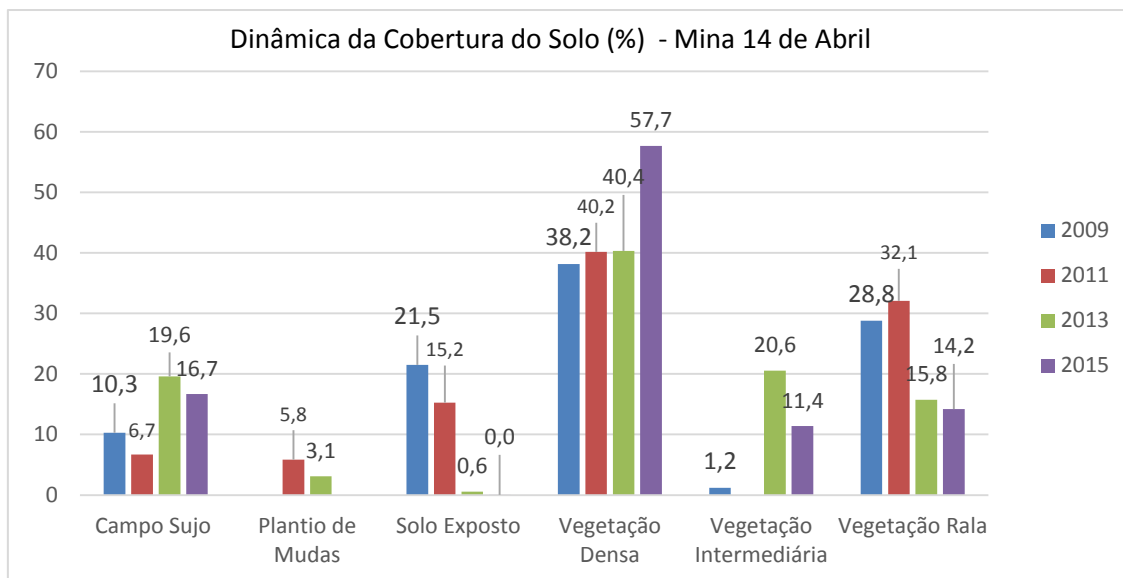


Figura 18 – Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina 14 de Abril para os 4 anos de estudo.

Já para a mina Cacimba (Figura 19), mesmo para plantios mais antigos (início década de 90), não houve mudanças significativas nos anos de 2009 e 2011, sendo que apenas a partir de 2013 ocorreu um gradual aumento da *vegetação densa*, mesmo ano que se teve um novo aporte de significativo de mudas. Anteriormente já se tinha tentado um enriquecimento, com o plantio de mudas entre 2005-2007, mas poucas se desenvolveram. Já em 2015 se observa um aumento real da vegetação classificada como densa, que tem maior porte e densidade, e não mais havendo a tipologia de *solo exposto*. A característica presente no tipo de planta de extração de minério dessa mina que é do tipo *Washing plant*, onde o solo sofre menor desestruturação, pois esse tipo de exploração mantém as frações argilosa e arenosa depositadas uma sobre a outra que mantém parte das características do solo original, facilitando o desenvolvimento de plantas de maior porte nesse último ano de estudo (BRSCAN, 2013).

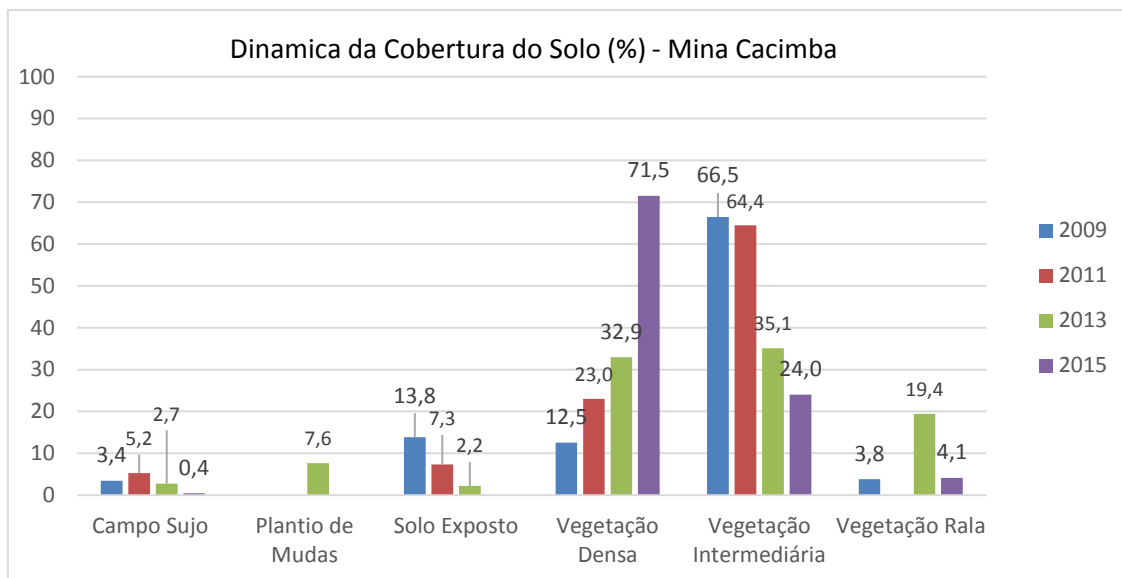


Figura 19 – Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Cacimba para os 4 anos de estudo.

A mina Duduca (Figura 20) é uma mina que tem seu plano de recuperação de áreas degradadas mais recente, o primeiro plantio é de 2003, quando foi realizado um novo PRAD para as áreas a serem recuperadas e um maciço repovoamento utilizando inúmeras espécies da família das leguminosas, espécies essas que tem rápido crescimento e muitas com ciclo de vida curto, ocasionando um rápido aumento no teor de matéria orgânica nos primeiros centímetros do solo. Esse resultado também ocorreu em função do tipo de extração de minério existente na área, que assim como a mina Cacimba era do tipo *Washing plant*, onde o solo sofre menor desestruturação, pois as frações argilosa e arenosa são depositadas uma sobre a outra, mantendo parcialmente as características do solo original (BRASCAN, 2013). Tendo quase toda sua área já em 2009 recoberta com *vegetação rala* e nos anos seguintes teve um grande aporte florístico e adensamento da vegetação, com área basal média no ano de 2015 de 10,27 m²ha⁻¹ e a *vegetação densa* ocupando 73,03% da área da mina.

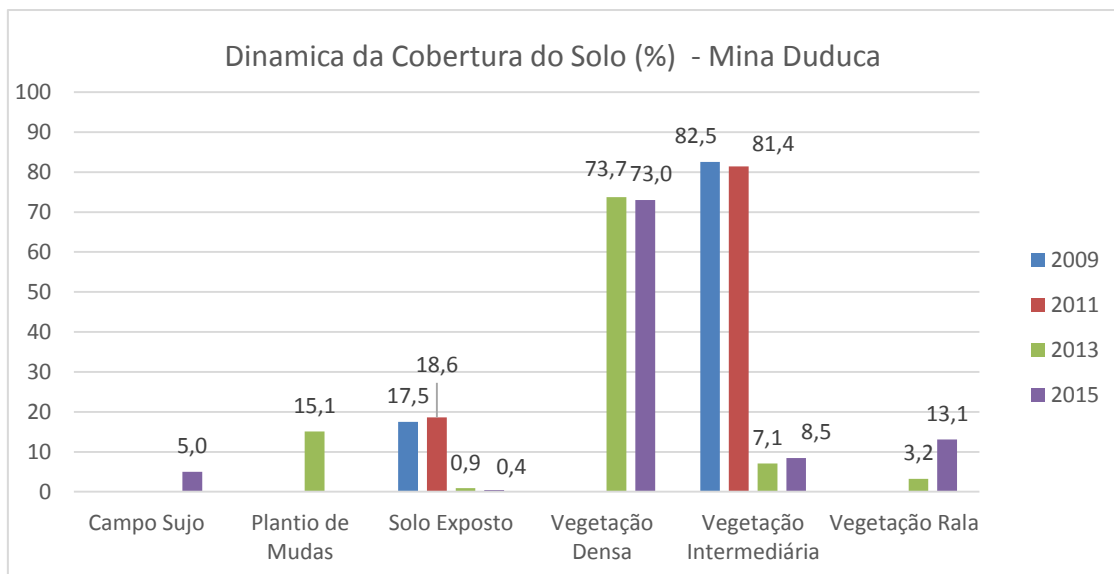


Figura 20 – Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Duda para os 4 anos de estudo.

A mina Novo Mundo (Figura 21) também tem as mesmas características tecnológicas e de implementação do PRAD que a mina Duda. Tendo resultados parecidos, sendo que esta é mais antiga, mas apenas depois de 2004, quando se implementou novamente o PRAD que foi possível observar crescimento e fixação das espécies no solo. Na cena do ano de 2009 nessa área já era observado um baixa ocorrência de solo exposto e pouco se observava de campo sujo, sendo o desenvolvimento vegetal das espécies arbóreas já em grande parte classificada com *vegetação rala* e nos anos seguintes se desenvolvendo em *vegetação intermediária e densa*, chegando em 2015 com 92,17% de sua área e área basal de $11,6 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$.

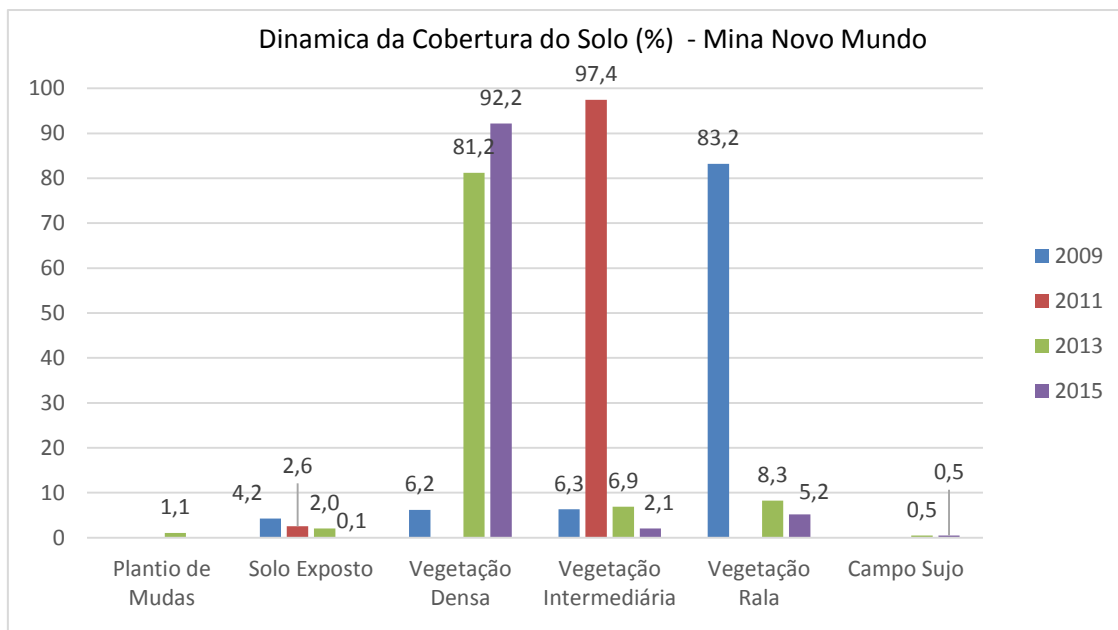


Figura 21 – Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Novo Mundo para os 4 anos de estudo.

A mina Poço B (figura 22) é uma mina também do início da década de 90, mas que apenas recebeu um aporte de mudas a partir de 2005, mas pelo tipo de substrato que é do tipo rejeito seco somado a uma área que é alagável o desenvolvimento vegetal é muito prejudicado pois poucas espécies são tolerantes a encharcamento de raízes durante meses do ano. Somado a este tipo de substrato reter pouca água, logo as plantas acabam por sofrer com a escassez de água durante parte do ano. Observando o gráfico se nota que a dinâmica de evolução da vegetação pouco se modificou, tendo um novo aporte de mudas em 2013 em cerca de 60% da área dessa mina. Ocorrendo no ano de 2015 um aumento da *vegetação rala e densa*, com 28,20% e 49,80% das áreas respectivamente, isso foi observado também na área basal média entre os talhões dessa mina que foi de 7,33 m²ha⁻¹.

Para a mina Potosí (Figura 23) não há parcelas de monitoramento vegetal (Brascan, 2015), mas observando o gráfico é possível constatar que em 2009 havia grande parte da mina, cerca de 52%, ainda com solo exposto e que recebeu um aporte grande de vegetação, pois gradativamente as áreas de solo descoberto foram sendo convertidos em vegetadas. No ano de 2015 já se observava que havia apenas um pouco mais de 5% de solo exposto restando recobrir, demonstrando que em poucos anos foi possível converter solos desnudos em áreas vegetadas com cerca de 47% de *campo sujo* e 33% de *vegetação rala*.

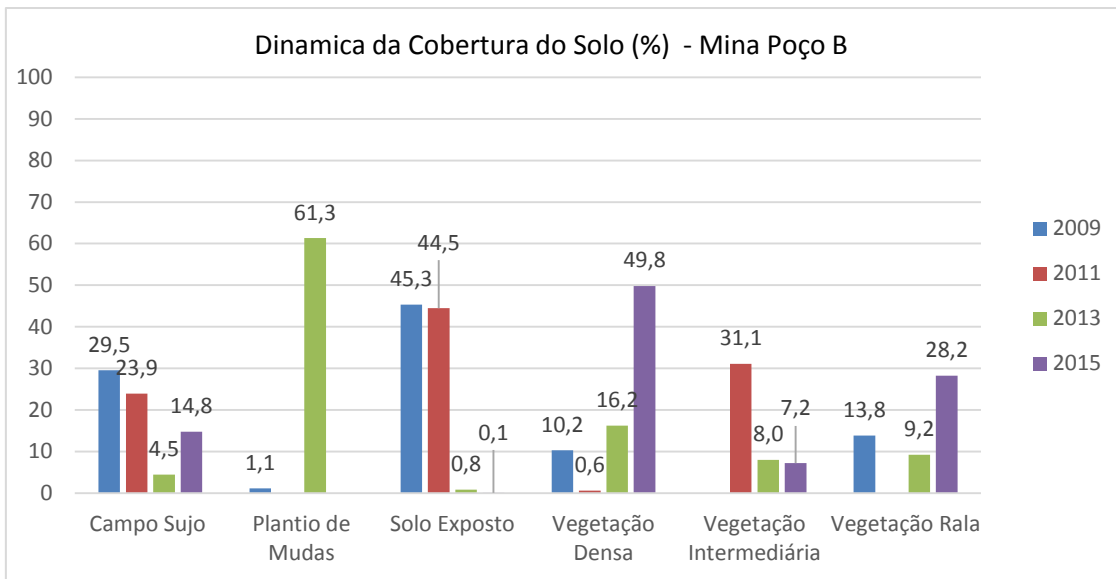


Figura 22 – Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Poço B para os 4 anos de estudo.

Nessa mina foi utilizada a técnica de cobrir as áreas arenosas, que predominava no local, com cerca de 30 cm de *topsoil* argiloso, o que favoreceu esse rápido desenvolvimento vegetal.

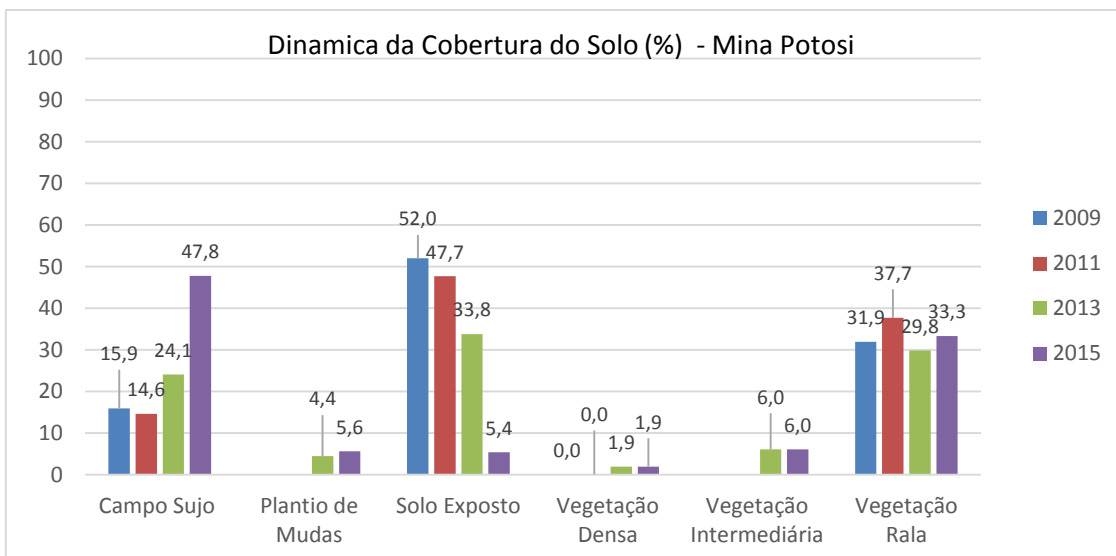


Figura 23 – Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Potosi para os 4 anos de estudo.

A mina Santa Maria é uma das áreas mais antigas (Brascan, 2015) e isto é comprovado também pelo porte da vegetação presente, possuía em 2009 uma área de solo exposto de 14% que em 2015 já estava praticamente suprimida, restando cerca de

5%. De acordo com o relatório feito e as parcelas de acompanhamento dessa mina, em 2015 a área basal média de $7,33 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ se aproximando da média das minas que é de $9,23 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ e para a FLONA (Floresta Amazônica) que é de $15 \pm 4 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$. A dinâmica ao longo dos anos é observada na figura 24.

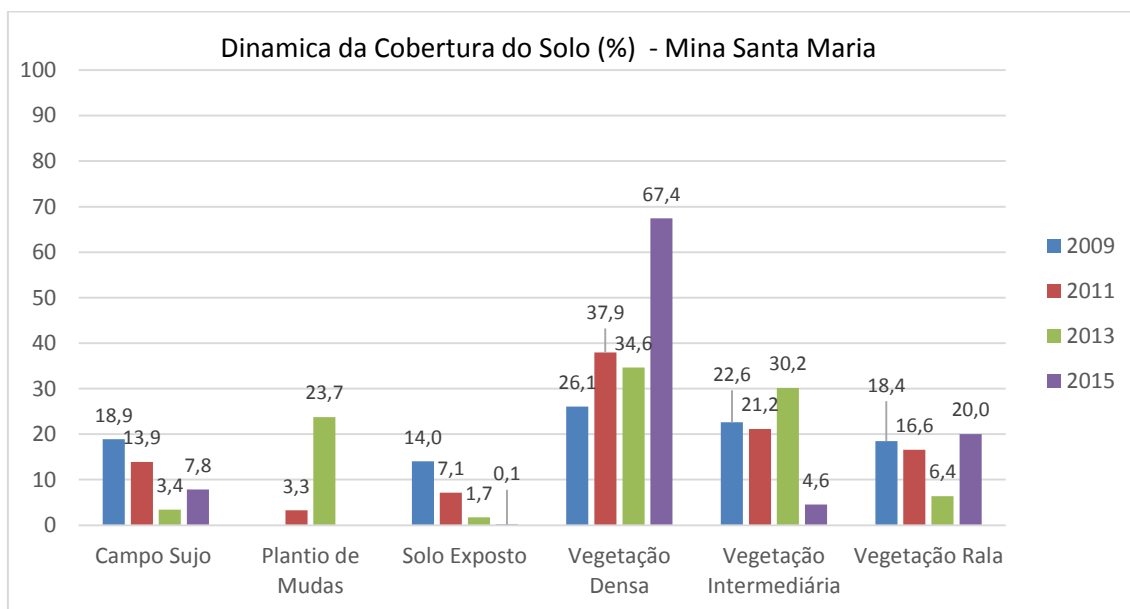


Figura 24 – Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Santa Maria para os 4 anos de estudo.

A mina Serra da Onça é também uma área igualmente antiga (Brascan, 2015) mas que possuía em 2009 quase um terço de sua área ainda de *solo exposto* de cerca de 33%. Já em 2015 a tipologia *solo exposto* praticamente não existia, ocupando menos de 1%. No ano de 2011 ocorreu um incêndio que queimou grandes áreas em desenvolvimento (cerca de 40%), o que causou a conversão de áreas de *vegetação rala e intermediária* em *campo sujo*. Já no ano de 2015 a área basal média de $9,4 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ desta, foi um pouco maior que a média das minas que é de $9,23 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$, demonstrando bons resultados do programa de recuperação. A dinâmica ao longo dos anos é observada na Figura 25.

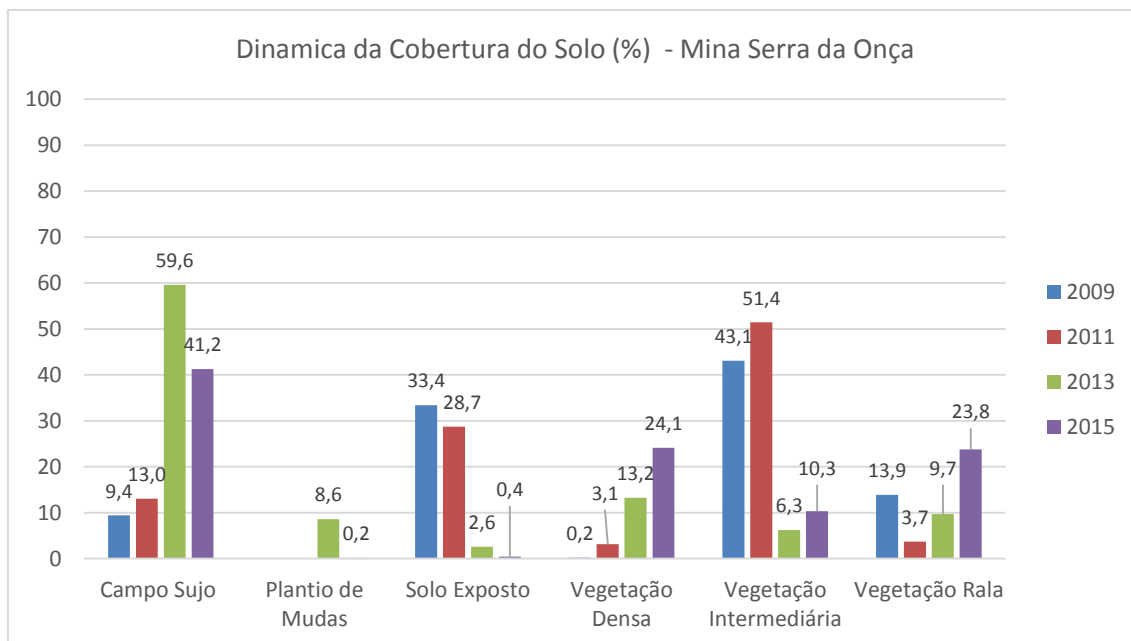


Figura 25 – Dinâmica da conversão das tipologias identificadas na Mina Serra da Onça para os 4 anos de estudo.

4.2. Dinâmica da Cobertura

4.2.1. Resultados obtidos com os modelos

Os resultados obtidos dos modelos de cálculo da matriz de transição para cada par de anos e as estimativas de probabilidades de transição para as células foram organizados e analisados, a partir de cálculos dos valores de pesos de evidência obtidos para as faixas de distância das variáveis estáticas e, dinâmicas.

A Tabela 2 apresenta os resultados das estimativas dos pesos de evidência do mapa da variável declividade para a passagem do ano de 2013 para 2015. A primeira coluna (*Intervalo*) representa as diferentes faixas ou categorias, a segunda coluna (*Transições Possíveis*) são os tamanhos das faixas ou categorias em células, a terceira coluna (*Transições ocorridas*) mostra o número de transições ocorridas dentro de cada faixa ou categoria, a quarta coluna (*Pesos dos coeficientes*) mostra os coeficientes dos pesos de evidências obtidos, a quinta coluna (*Contraste*) é a medida do contraste, que mede o efeito de associação/repulsão. Nessa coluna, quanto mais próximo de zero forem os valores, menores serão os efeitos e quanto maiores forem os valores, maior será a atração. Por outro lado, se esses valores forem maiores e negativo, maior será a

repulsão. No caso da última coluna (*Significância*) é indicado se existe ou não significância estatística para transição.

Tabela 2. Valores dos pesos de evidência para as faixas de distância da variável declividades (slope) para a transição de *solo exposto* para *campo sujo*.

Transição: 1->2	Variável: declividade/layer_0				
	Transições Possíveis	Transições Executadas	Pesos dos Coeficientes	Contraste	Significância
0 <= v < 2	514	104	0,096358	0,113863	não
2 <= v < 3	411	94	0,252517	0,289881	sim
3 <= v < 4	241	38	-0,207495	-0,222036	não
4 <= v < 5	379	83	0,196606	0,222624	não
5 <= v < 6	262	30	-0,577416	-0,616280	sim
6 <= v < 7	248	30	-0,515173	-0,548600	sim
7 <= v < 8	187	15	-0,971320	-1,011186	sim
8 <= v < 9	187	29	-0,227175	-0,239255	não
9 <= v < 10	178	45	0,384438	0,408093	sim
10 <= v < 11	118	26	0,204432	0,212168	não
11 <= v < 12	88	9	-0,704099	-0,718667	sim
12 <= v < 13	133	29	0,191029	0,199182	não
13 <= v < 14	150	43	0,556496	0,586525	sim
14 <= v < 15	50	15	0,620827	0,631778	sim
15 <= v < 16	74	15	0,098637	0,100871	não
16 <= v < 17	81	19	0,285429	0,292937	não
17 <= v < 18	17	10	1,824799	1,837922	sim
18 <= v < 19	24	1	-1,667370	-1,674066	não
19 <= v < 20	43	9	0,138988	0,140823	não
20 <= v < 21	13	0	-9,034319	~ 0	não
21 <= v < 22	12	1	-0,929771	-0,932156	não
22 <= v < 24	11	0	-8,867287	~ 0	não
24 <= v < 37	24	0	-9,647369	~ 0	não
	-----	-----			
	3445	645			

Os resultados obtidos do modelo de cálculo do peso de evidência (*Weight Coefficient*) indicam se um dado *pixel* que compõe a matriz de cobertura do solo é ou não favorável à transição da tipologia de cobertura do solo no espaço de tempo determinado. Resultados positivos indicam que a modificação do *pixel* é favorável e

valores negativos indicam que o *pixel* é desfavorável à ocorrência de mudança da tipologia. Na execução dos cenários, para cada mapa de variável e por período (2009 a 2011, 2011 a 2013 e 2013 a 2015), foram estimados os coeficientes e pesos, além de calcular a significância do intervalo da variável calculada para todas as variáveis utilizadas no modelo: pluviosidade, radiação solar, declividade, tipo do substrato e ocorrência de queimada, sendo todas significativas para explicar o desenvolvimento e evolução das áreas de minas, em pelo menos uma faixa de transição.

Após realizar a modelagem de cada par de anos foi possível identificar visualmente quais valores melhor prediziam as mudanças no ano seguinte. Como exemplo se observa o resultado da simulação do ano de 2015 a partir de 2013 podendo ser observado na Figuras 26, que apresenta, respectivamente, o mapa inicial de 2013 de uso observado, o mapa do ano de 2015 observado e o simulado pelo modelo para o ano de 2015, em detalhe da mina Cacimba.

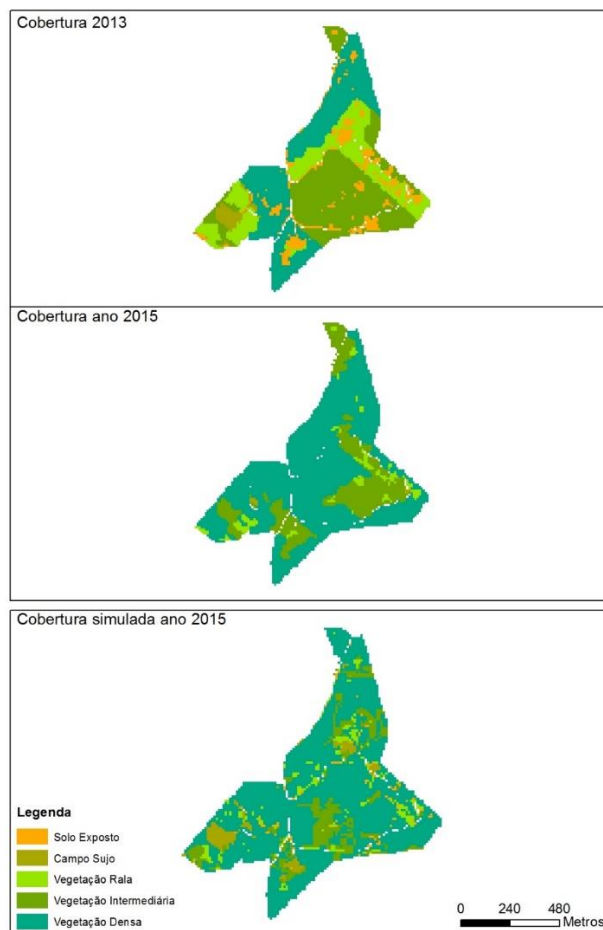


Figura 26a, 26b e 26c – Mapa simulado para 2015 partir da observação do ano de 2013, exemplo mina Cacimba.

Para comparar os índices de concordância entre os dados preditos e os observados, se faz necessário a criação de um modelo de similaridade (Figura 27). Esse operador compara a paisagem inicial, final e a simulada e calcula o índice de acertos a concordância para o mapa simulado como um todo, utilizando logica *fuzzy* (HAGEN,2003) para a simulação de 2013 utilizando 5 variáveis ambientais: declividade, média da precipitação anual, radiação solar anual, tipo de substrato e ocorrência de fogo.

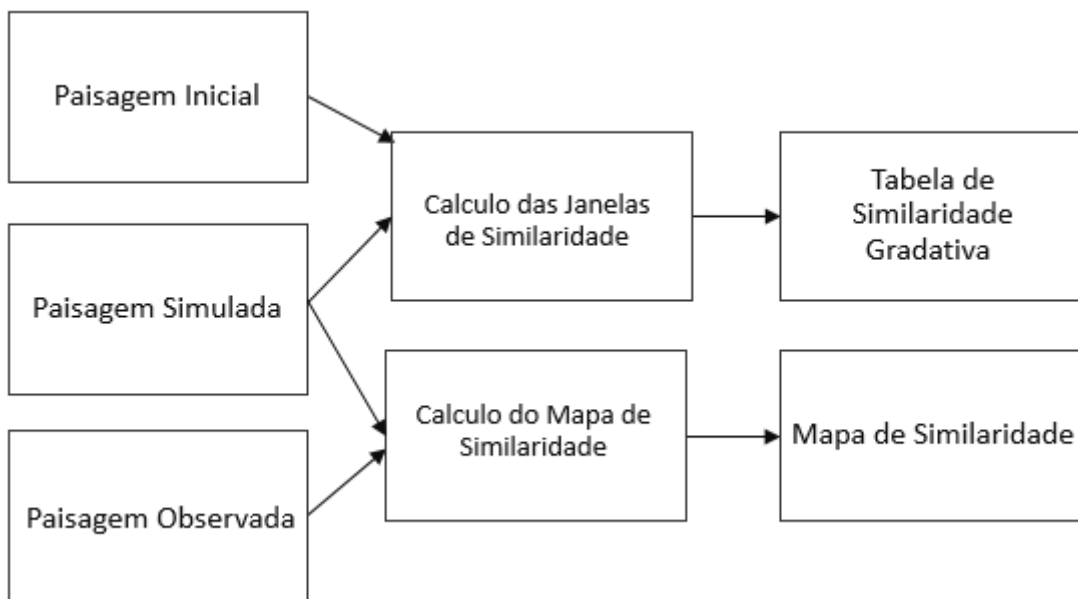


Figura 27 – Modelo de similaridade entre os dados observados e o simulado.

Para os três pares de anos foram calculados o índice de concordância, visando escolher o modelo que melhor faça a simulação da paisagem. A análise foi feita utilizando janelas (pixel) de 1x1, 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11.

Os resultados obtidos tendo como mapa inicial 2009 na comparação entre a paisagem observada e a paisagem simulada para o ano de 2011 é mostrado na Figura 28.

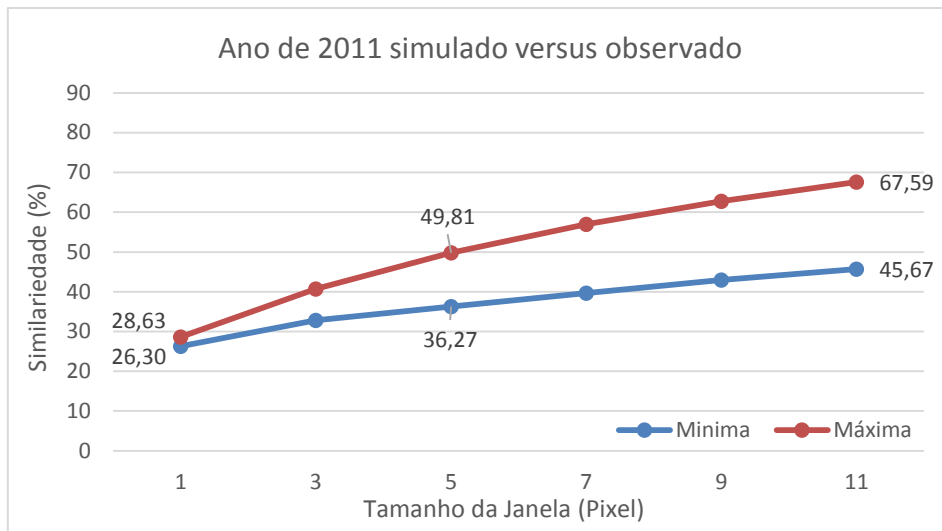


Figura 28 – Gráfico de similaridade do cenário simulado para o observado no ano de 2011 em função de decaimento constante.

A variação entre os valores calculados para janela de 1x1 com apenas 28,63% e a janela de 11x11 com 67,59% de demonstram que a paisagem de 2011 simulada pouco foi similar a paisagem observada, demonstrando que outros fatores não inerentes ao modelo que influenciaram na mudança da paisagem nestes dois anos.

Para a simulação do cenário de 2013 usando 2011 observado se obteve uma paisagem simulada de 2013 com um índice de similaridade variando de 43,96% para uma janela de 1 pixel, com de 10 metros e de 69,83% para uma janela com 10 pixels vizinhos, visto na figura 29.

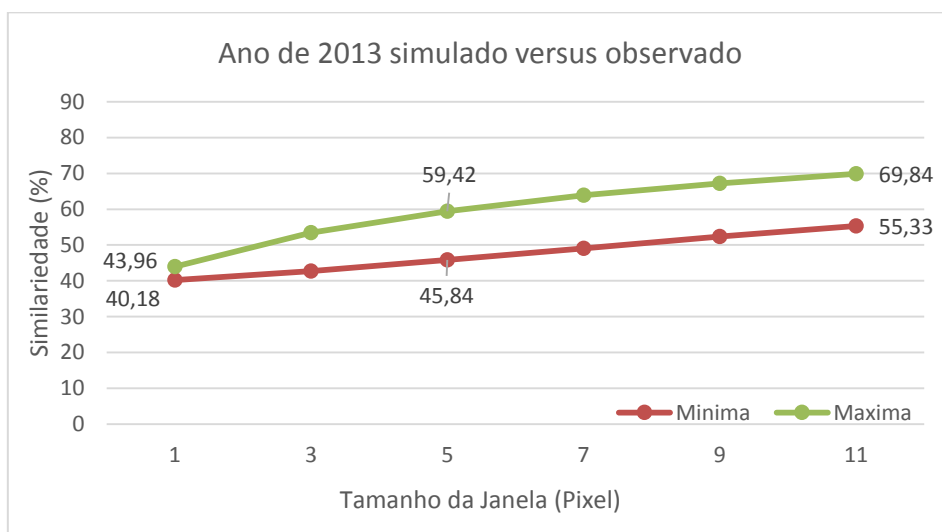


Figura 29 – Gráfico de similaridade do cenário simulado para o observado no ano de 2013 em função de decaimento constante.

Já para a simulação do cenário de 2015 usando 2013 teve valores de similaridade variando de 50,02% para uma janela de 1 pixel e de 81,24% com janelas de 11 pixel. Conclui-se que o modelo obteve 81,24% de acerto e concordância entre os dados observados e os simulados, visto na Figura 30.

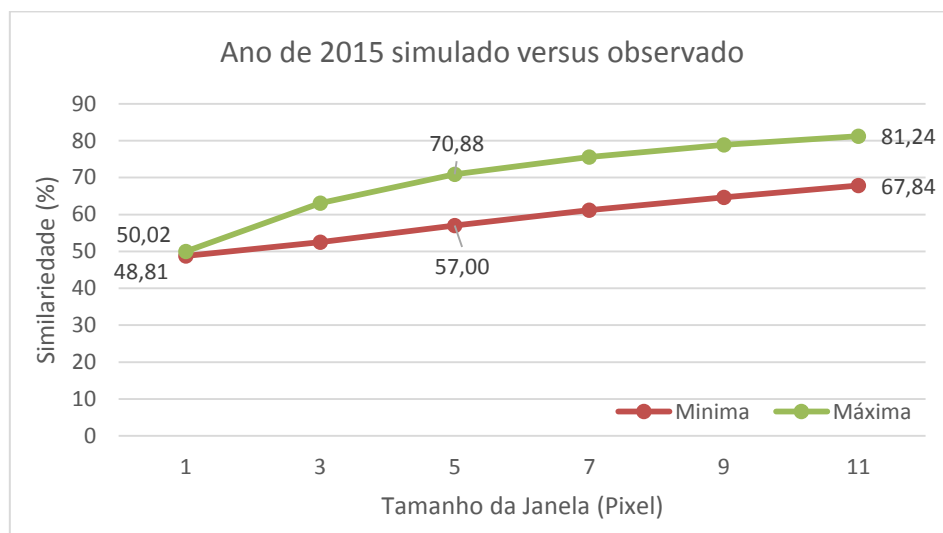


Figura 30 – Gráfico de similaridade do cenário simulada para o observado no ano de 2013 em função de decaimento constante.

A simulação da paisagem de 2015 usando 2013 teve valores de similaridade *fuzzy* muito bons e dentro do recomendado por Schroder (2016), Souza (2014), Piontekowski (2014) e Soares-filho (2006), que recomendam que se utilize como base de comparação os valores da janela de 5x5 ou menos.

4.2.2. Simulação de cenários

Utilizando o modelo de simulação de 2015, a partir do mapa de cobertura do ano de 2013 foram gerados cenários para o desenvolvimento da vegetação para os anos de 2020, 2025, 2035 e 2065. A evolução da cobertura foi quantificada para cada uma das oito minas e os mapas dos cenários simulados para comparação visual são apresentados. A Figura 31 apresenta a evolução da mina 14 de abril, nela é possível observar a gradual conversão da classe *campo sujo* evoluindo para *vegetação rala* e *intermediária* de forma gradual para os anos seguintes. Na Figura 32 se observa essa evolução.

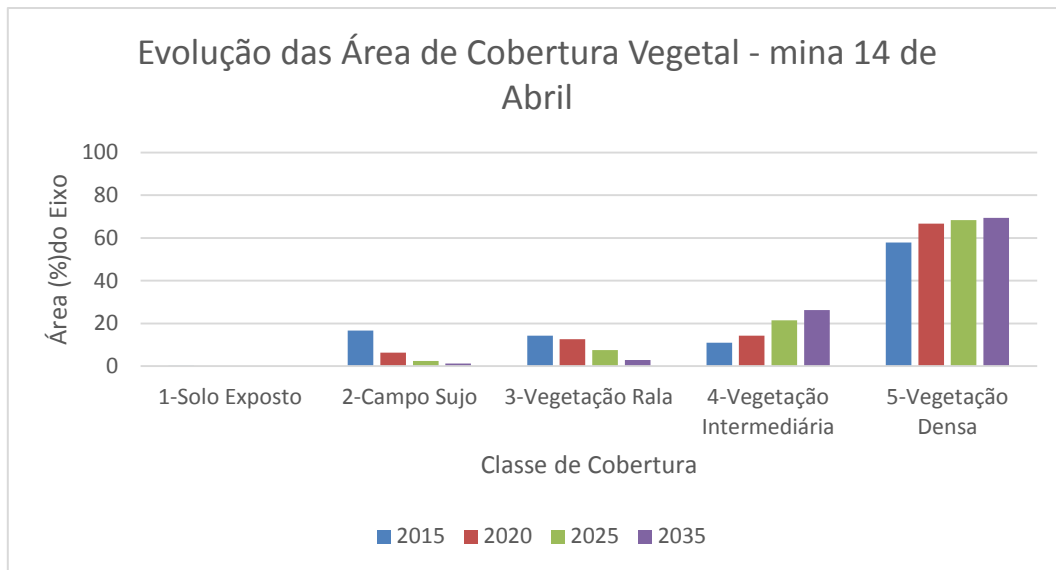


Figura 31 – Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina 14 de Abril

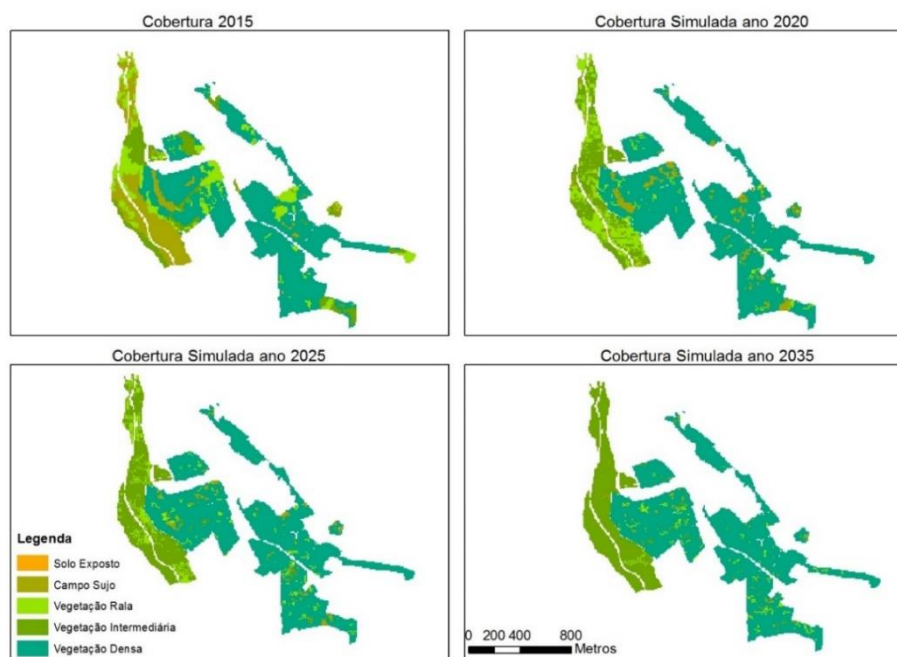


Figura 32 – Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina 14 de Abril.

Observando o gráfico de evolução da cobertura a partir de 2015 da mina Cacimba (Figura 33) se observa que a mina já estava em um nível de desenvolvimento vegetal satisfatório neste ano. Essa mina é uma das mais antigas, e já no ano de 2015 tinha quase 70% de sua área classificada como *vegetação intermediária ou densa*, e acabou

por se estabilizar nos anos seguintes, seguindo a tendência observada na média total das minas (Figuras 33 e 34).

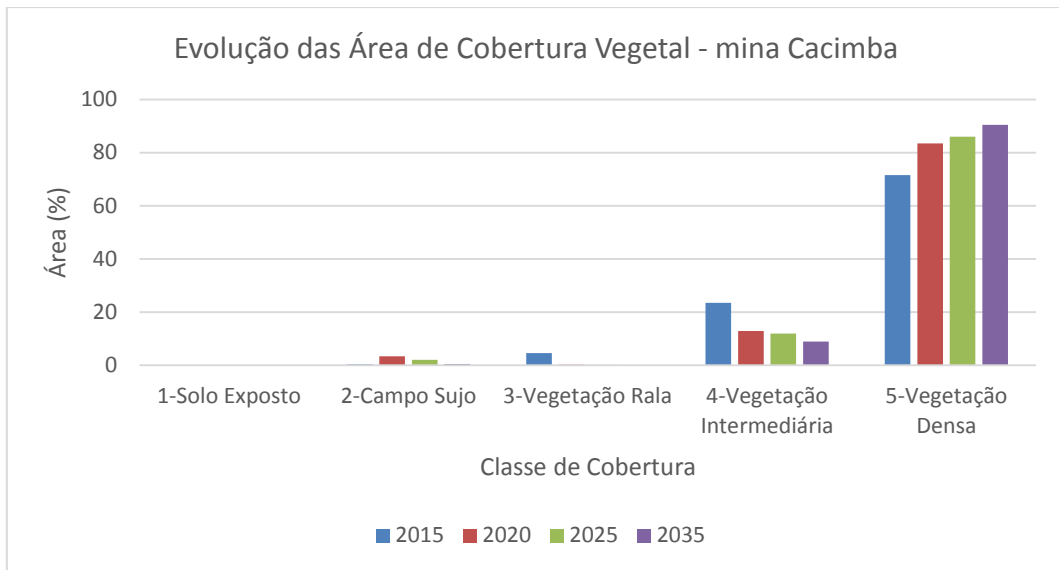


Figura 33 – Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Cacimba.

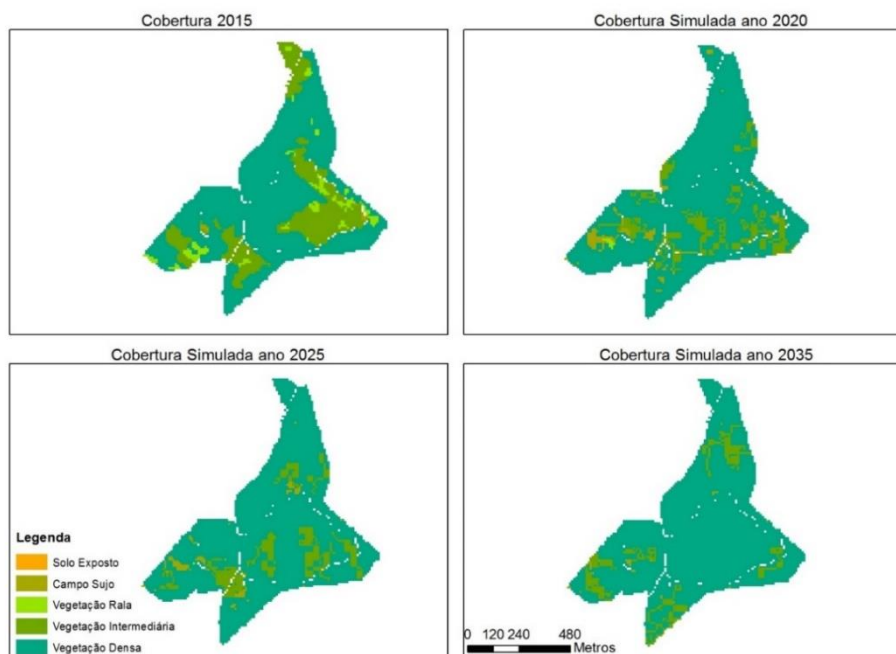


Figura 34 – Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Cacimba.

A mina Duduca é uma das minas com melhor desenvolvimento vegetal com quase toda sua área já coberta por *vegetação densa*, cerca de 70% no ano de 2015. Visto nas Figuras 35 e 36, a evolução da paisagem simulada para os anos seguintes demonstra

que em 5 anos as tipologias *campo sujo* e *vegetação rala* pouco ocorreram, demonstrando uma estabilização da vegetação, com provavelmente valores área basal semelhantes aos valores encontrados na floresta amazônica em 10 anos.

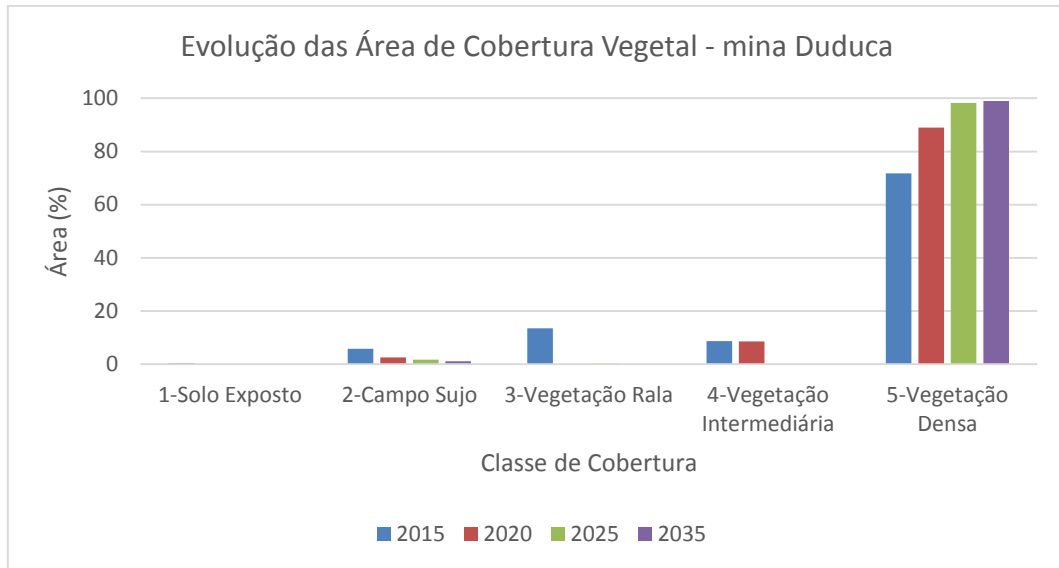


Figura 35 – Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Dudaça.

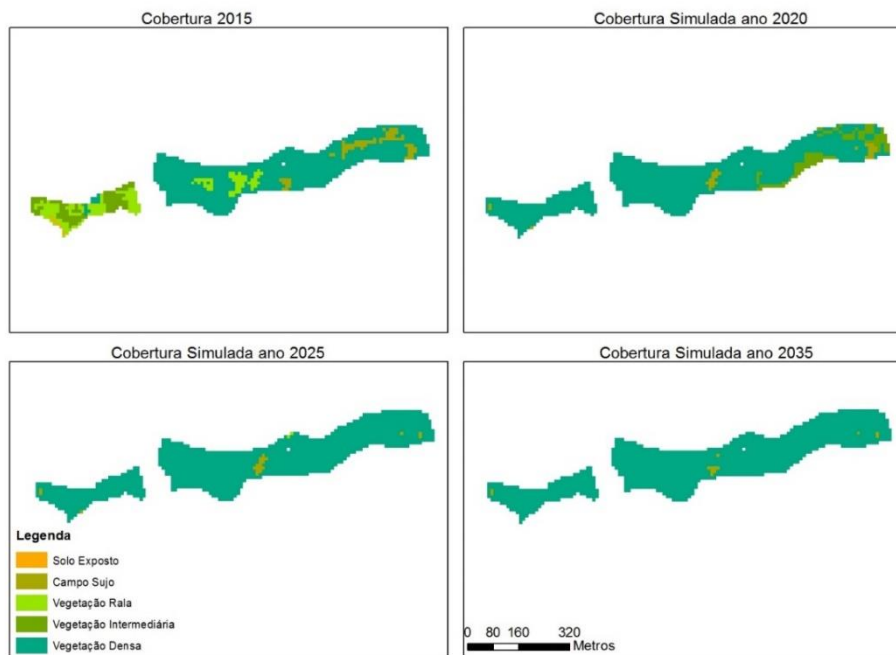


Figura 36 – Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Dudaça.

A mina Novo Mundo tendo as mesmas características de PRAD e de substrato que as minas Dudaça e Cacimba, que é do tipo *Washing Plant*, é uma das áreas com melhor desenvolvimento vegetal, com praticamente toda sua área coberta por

vegetação densa (cerca de 92% no ano de 2015). Analisando as Figuras 37 e 38, o desenvolvimento da paisagem simulada para os anos seguintes demonstram que em 5 anos as tipologias *campo sujo* e *vegetação rala* pouco ocorreram, mesmo comportamento das minas com a mesma tecnologia de mineração, tendo em 10 anos provavelmente valores área basal semelhantes ou melhores que os encontrados na floresta amazônica dentro desta FLONA.

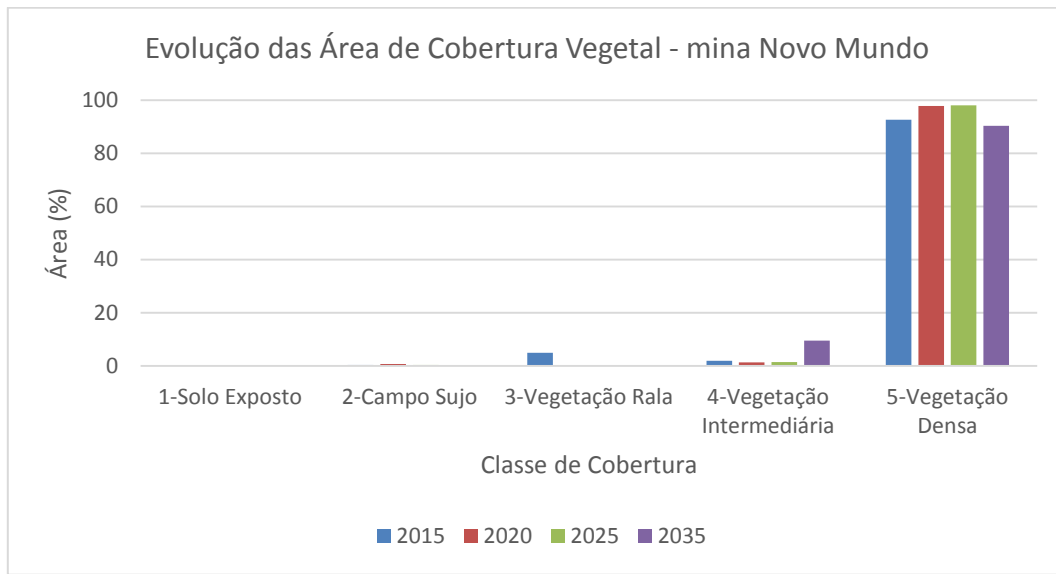


Figura 37 – Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Novo Mundo.

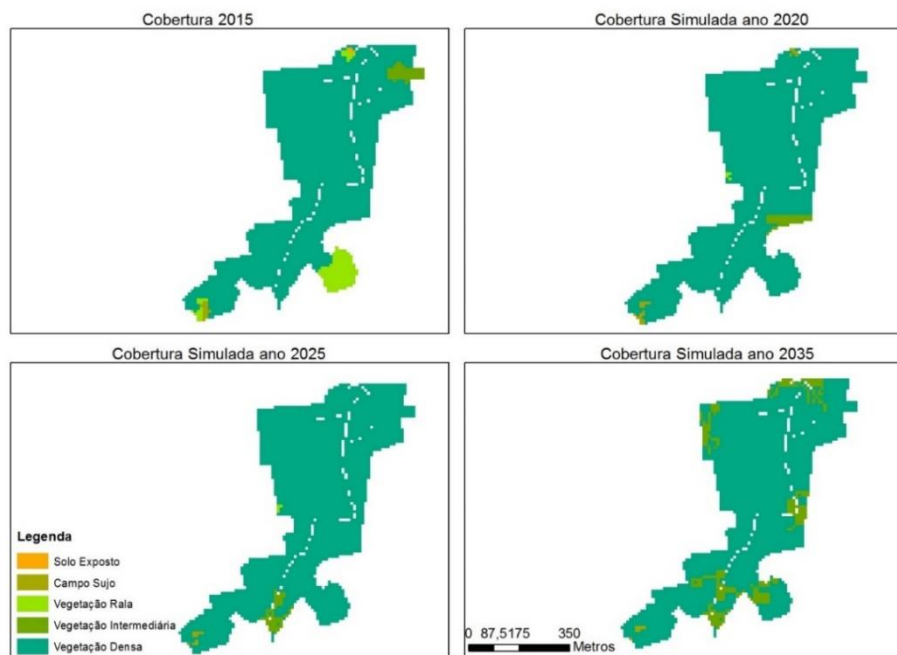


Figura 38 – Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Novo Mundo.

A mina Poço B tem quase em toda sua área forrada pelo substrato do tipo rejeito seco que ocupa quase 98% da área dessa mina, mas tendo já em 2015 boa parte de sua área coberta por *vegetação densa*. Em geral, esse tipo de substrato dificulta o desenvolvimento da vegetação, pois possui granulometria predominantemente areia, com baixa retenção de umidade no solo, o que acaba por dificultar a evolução da vegetação (Figuras 39 e 40).

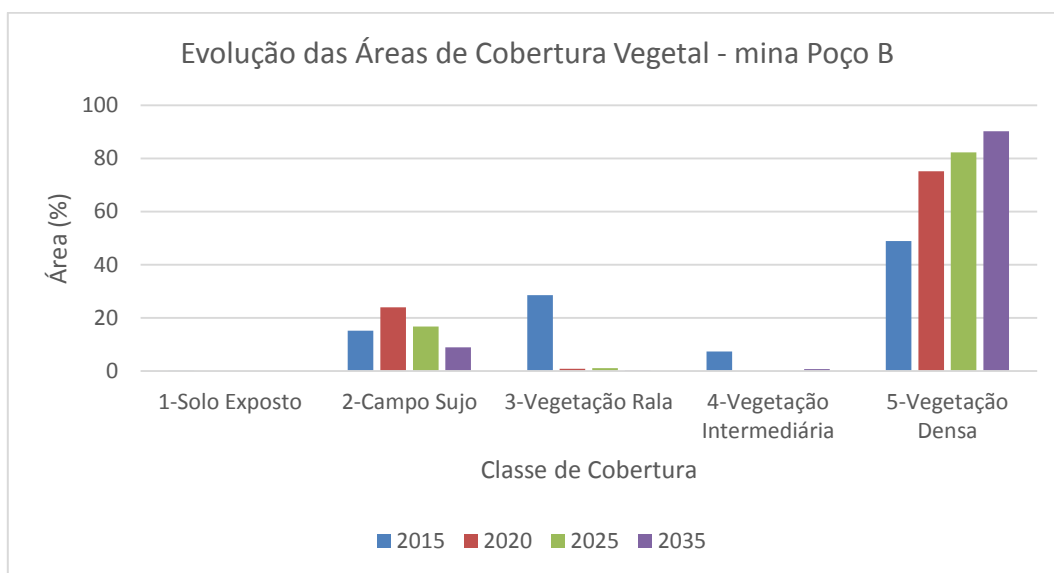


Figura 39 – Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Poço B.

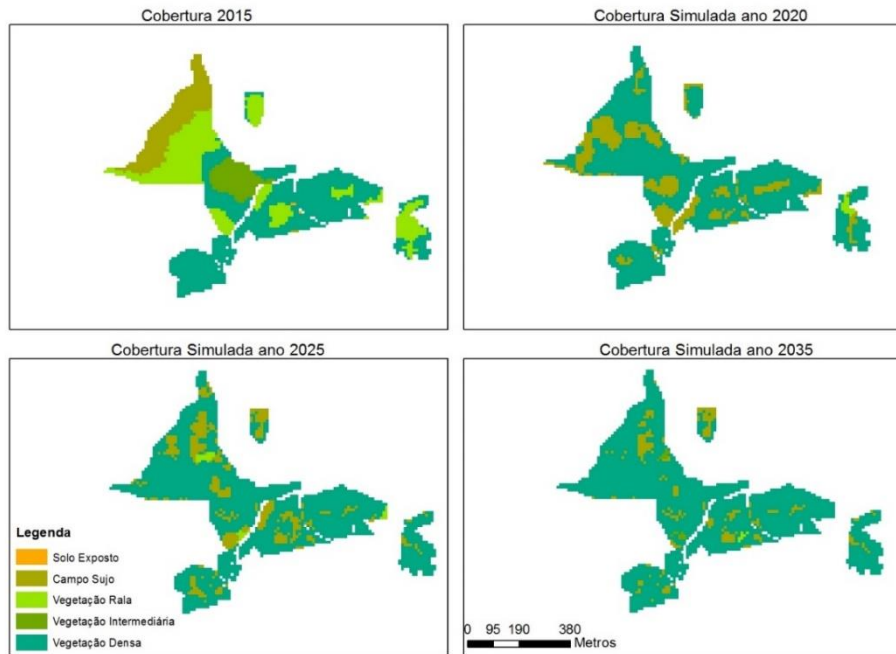


Figura 40 – Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Poço B.

A Mina de Potosí possui muitos de seus talhões cobertos com substrato do tipo rejeito seco (cerca de 72%), que dificulta o desenvolvimento da vegetação. Observando os cenários futuros é possível verificar que a evolução da paisagem se dará no para as tipologias *campo sujo* e *vegetação rala* no período de 20 anos entre 2015 e 2035, (Figuras 41 e 42).

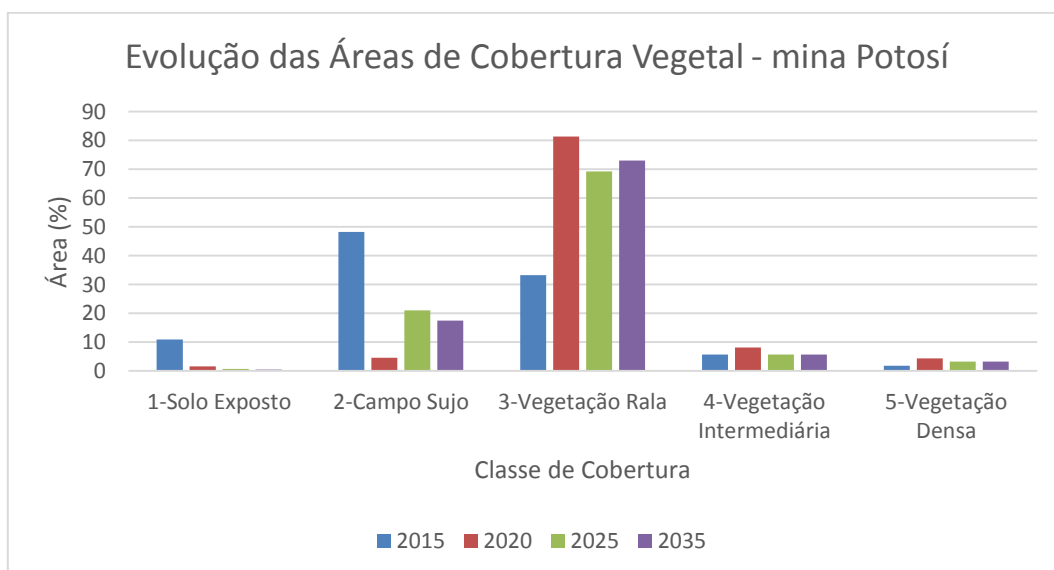


Figura 41 – Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Potosí.

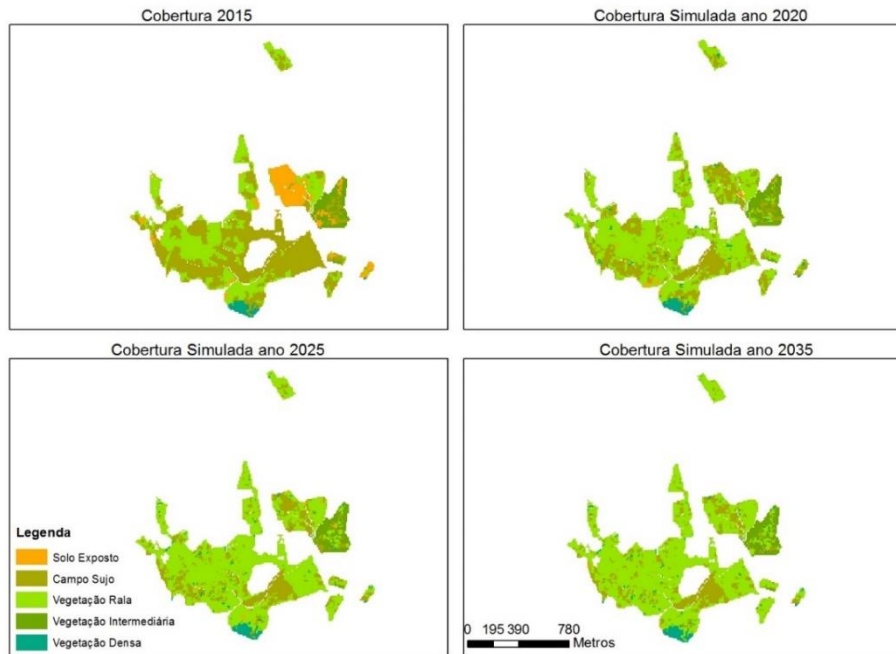


Figura 42 – Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Potosí.

A mina Santa Maria é uma das mais antigas minas, tendo cerca de 77% de suas áreas cobertas com piso de lavra. No entanto no ano de 2015 essa mina possuía uma área basal de pouco mais de $7 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ e cerca de 67% da área coberta por *vegetação densa*. Na simulação ocorre uma evolução satisfatória da cobertura florestal, com exceção das áreas com rejeito seco, que se manteve relativamente estável quando se observa os cenários futuros, (Figuras 43 e 44).

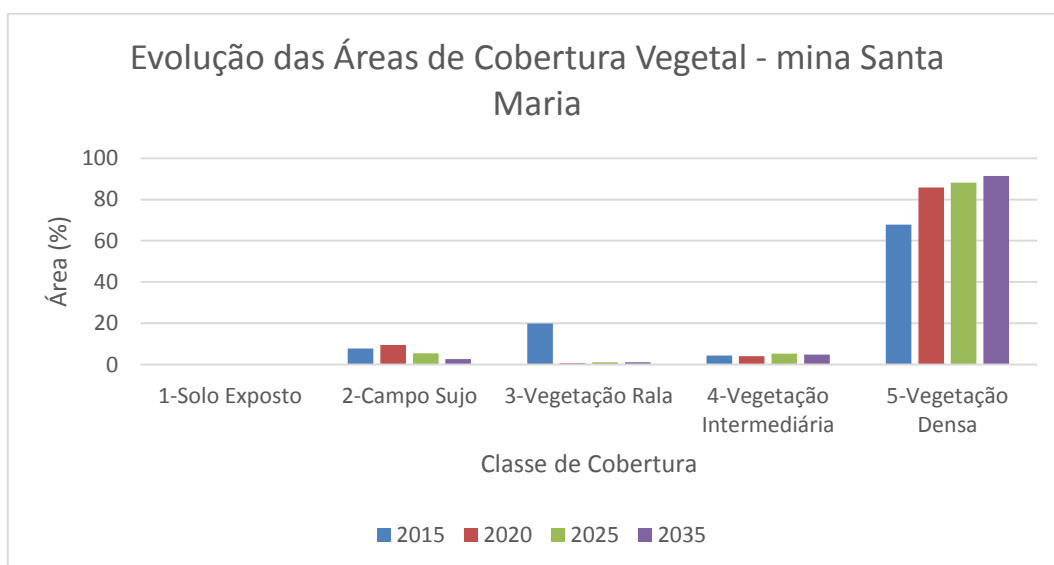


Figura 43 – Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Santa Maria.

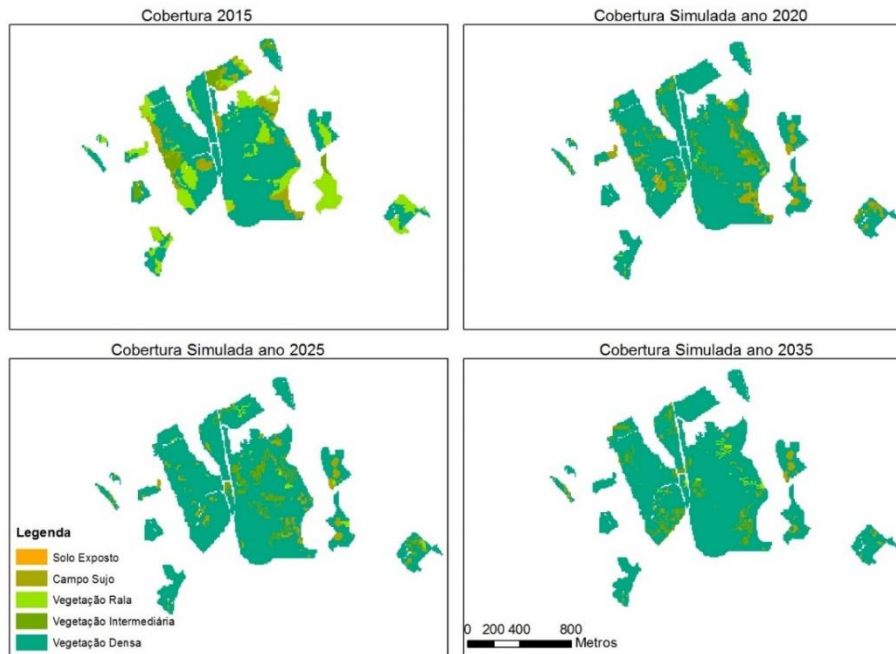


Figura 44 – Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Santa Maria.

A mina Serra da Onça possuía ainda no ano de 2015 cerca de 41% de sua área classificada como *campo sujo*, mas analisando os cenários simulados, e a evolução da cobertura, quase toda essa tipologia será convertida em *vegetação rala* e *intermediária* logo nos primeiros anos, Figura 45. Mas observando os cenários dos anos de 2025 e 2035 constata-se que a paisagem não evoluirá de forma rápida para a tipologia vegetação densa, Figura 45 e 46. Os tipos de substratos presentes nessa mina são bem variados, como rejeito seco e piso de lavra que dificultam a evolução plena da paisagem.

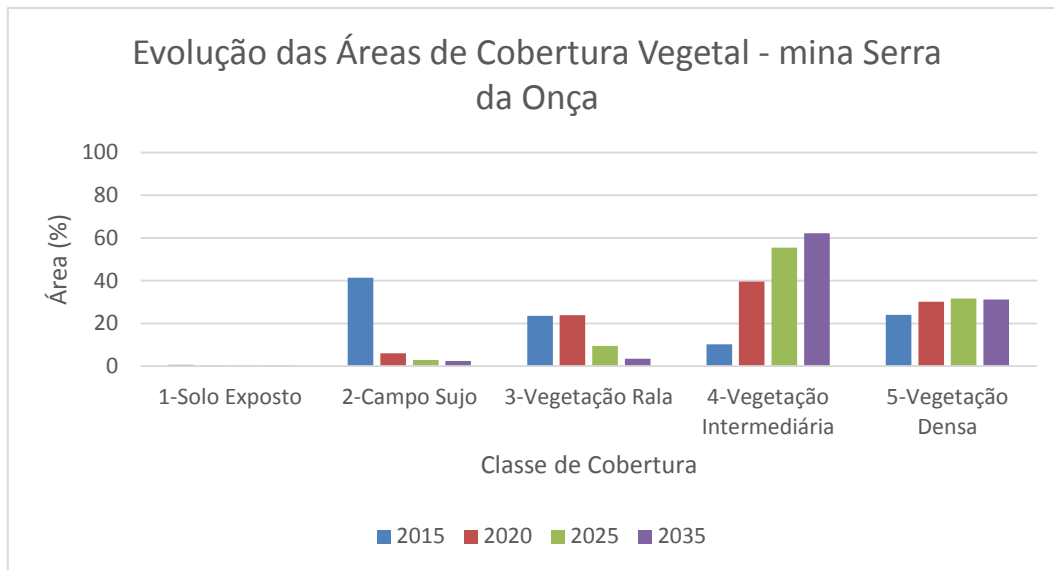


Figura 45 – Evolução da cobertura vegetal para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2035, para a mina Serra da Onça.

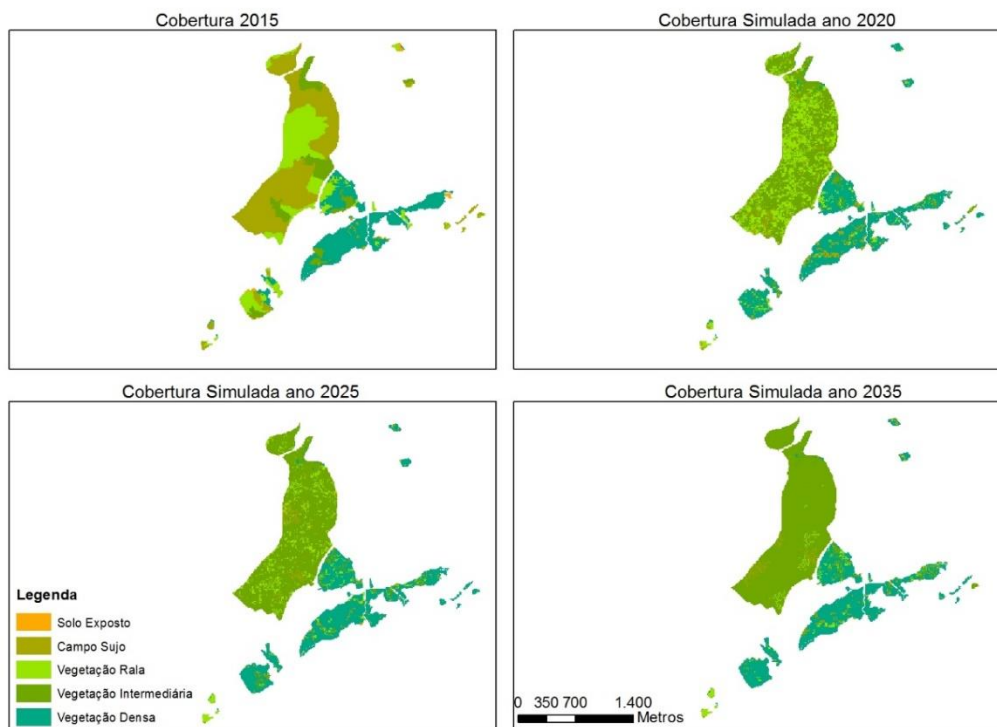


Figura 46 – Paisagem observada (2015) e simuladas para os anos de 2020, 2025 e 2035, para a mina Serra da Onça.

Visando analisar o desenvolvimento de cada uma das cinco tipologias de cobertura vegetal que ocorrem nas oito minas foi calculado individualmente cada uma destas e são mostrados nos gráficos das Figuras 47 ao 51.

Observando a dinâmica da tipologia *solo exposto* (Figura 47) consta-se que em 2009 ela representava um pouco mais que um quarto das áreas de minas (27,33%) e que veio decrescendo ao longo do período estudado, ocupando em 2015 apenas 1,7% das áreas, fruto de boas práticas silviculturas. Já para no ano de 2020 a área ocupada por essa tipologia será de apenas 0,2% e estabilizando, mas ainda ocorrendo nas minas.



Figura 47 – Gráfico da área ocupada de solo exposto no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.

Já a tipologia *campo sujo* (Figura 48) que em 2009 ocupava uma área de 14,87% aumentou no período de 2011 para 2013, fruto da ocorrência de queimadas que ocorreram nesse período e da conversão de solo exposto para esta tipologia, chegando em 2015 a ocupar uma área de 24,89% das minas, passando nos anos futuros a diminuir gradativamente até estabilizar no ano de 2035 representando 4% das áreas das minas.

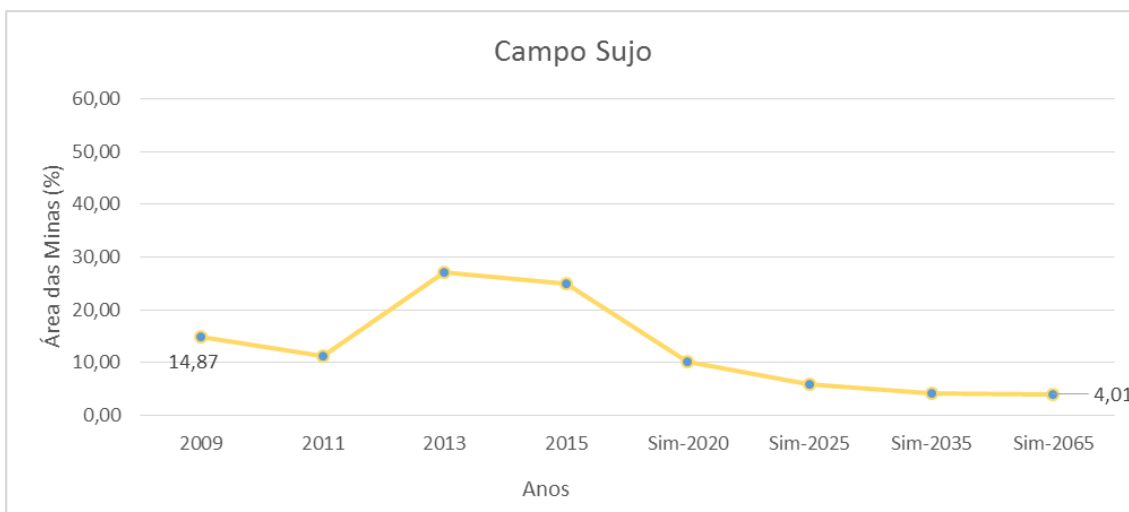


Figura 48 – Gráfico da área ocupada de campo sujo no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.

Observando a dinâmica da tipologia *vegetação rala* (Figura 49), verifica-se que essa tipologia pouco variou ao longo dos anos estudados. No ano de 2009 representava 18%, sendo uma cobertura de solo recorrente e presente em todas as minas ao longo dos anos, em 2015 ela representava 20%. Já para os anos futuros essa cobertura terá um leve decréscimo chegando a estabilizar no ano de 2035 em 11% estando ainda presente na paisagem das minas.

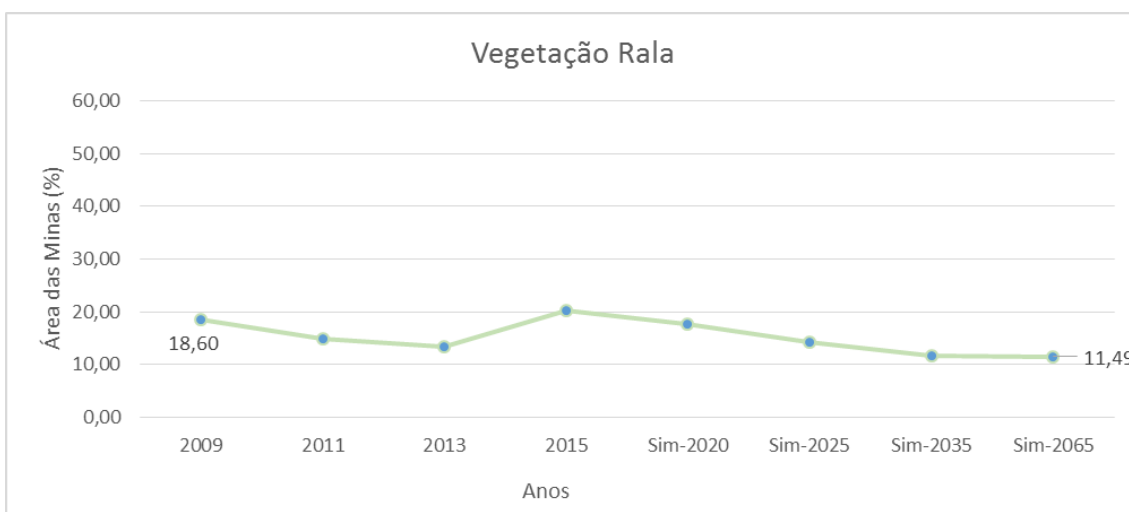


Figura 49 – Gráfico da área ocupada de vegetação rala no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.

Analisando a tipologia de *vegetação intermediária* (Figura 50) se observa que essa oscilou ao longo dos anos estudados, começando no ano de 2009 em que ela representava 25% da cobertura presente e em 2011 passou a representar 32% da área das minas, demonstrando que o desenvolvimento arbóreo estava bom e as ações de restauração dando resultados. Em 2013 essa tipologia voltou a diminuir chegando em 2015 a representar 9% das áreas das minas, o que foi resultado de sua evolução para vegetação densa. Já aumentando em 2020 passando a representar 18%, fruto da dinâmica de evolução vegetal, pois parte das áreas de *vegetação rala* que diminuíram passaram a fazer parte dessa tipologia *intermediária* e essa também evoluiu passando a ser considerada *vegetação densa*, chegando a estabilizar no ano de 2035 em 27,9% das áreas das oito minas.

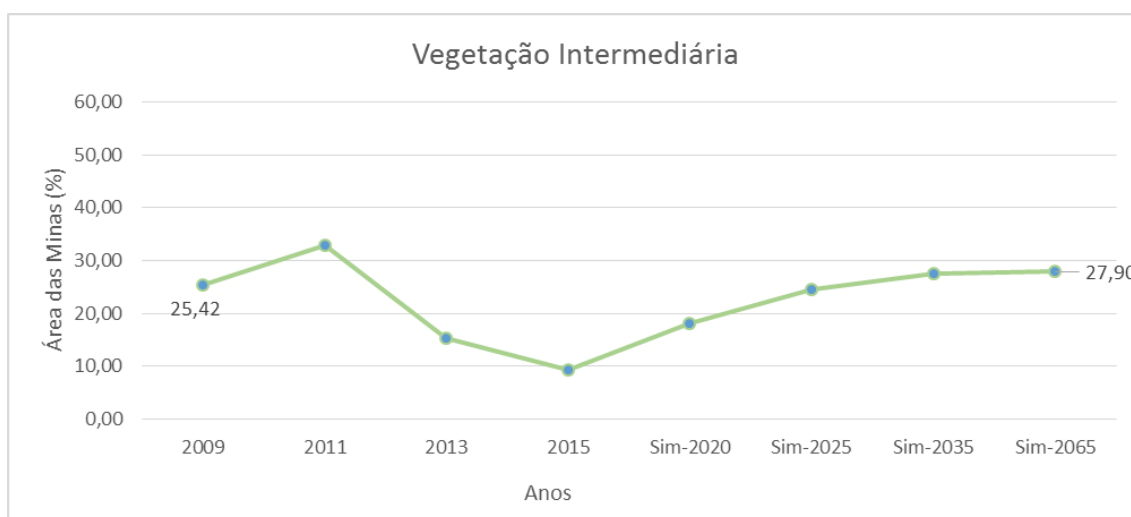


Figura 50 – Gráfico da área ocupada de vegetação intermediária no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.

Analisando o desenvolvimento da tipologia *vegetação densa* (Figura 51) se observa que a área coberta por ela vem desde o ano de 2009 aumentando gradativamente. Essa constatação é um bom sinal pois demonstra que o PRAD pelo qual as minas estão sendo restauradas está tendo bons resultados, os objetivos do PRAD estão sendo alcançados, visto que essa tipologia é a mais similar ao da floresta amazônica. No ano de 2035 a dinâmica da *vegetação densa* estará estabilizada, ocupando uma área de 56% das minas.

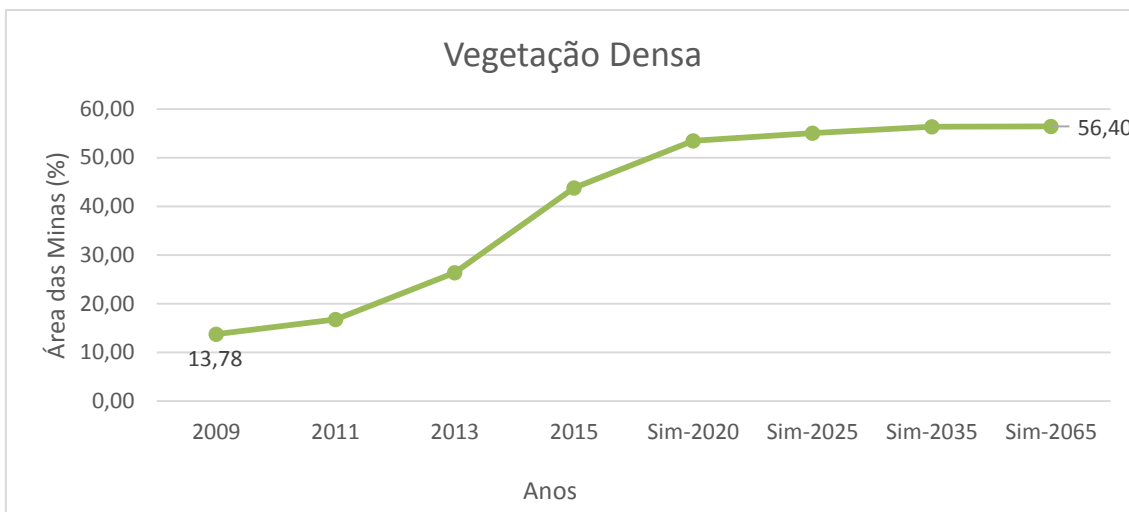


Figura 51 – Gráfico da área ocupada de vegetação densa no período de 2009 a 2015 e área estimada para o período de 2015 a 2065.

No ano de 2035 a cobertura vegetal se estabilizará, as minas terão cerca de 4,21% de *campo sujo*, 11,56% de *vegetação rala*, 27,58% de *vegetação intermediária* e mais de 56,35% de *vegetação densa* (Figura 52).

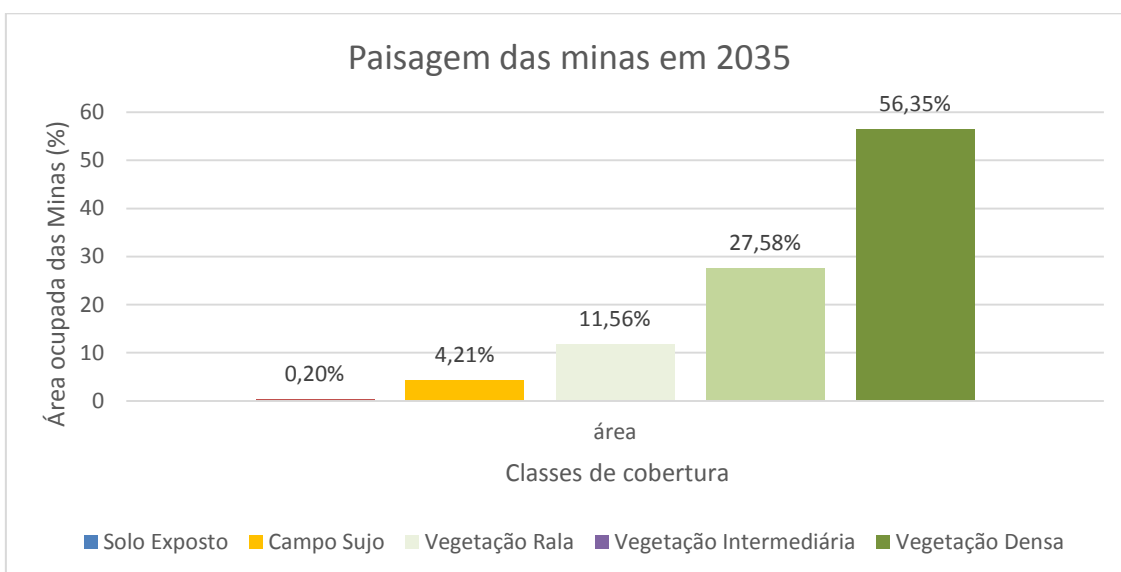


Figura 52 – Gráfico da área ocupada pelas classes de cobertura vegetal ano de 2035.

5. CONCLUSÕES

Com mapeamento da cobertura das oito minas foi possível avaliar o desenvolvimento da vegetação em seis anos de estudo, onde solo exposto e campo sujo ocupavam 42,2% das áreas e que em 2015 passaram a ocupar apenas 26,6%.

Foi constatado que o tipo de substrato interfere e dificulta a evolução e povoamento da vegetação nas minas, minas com substratos do tipo *washing plant* (minas da Cacimba, Duduca e Novo Mundo) obtiveram melhores resultados de área basal e de aporte vegetal. Já minas com substratos do tipo rejeito seco e piso de lavra, foi observado que o desenvolvimento vegetal é menos abundante e mais lento. Sendo que a ocorrência de incêndios seriam mais devastadores em talhões com esse tipo de substrato.

A simulação utilizando a modelagem da paisagem, adaptando a metodologia e conceitos utilizados para o qual o software DINAMICA-EGO foi proposto, retornaram resultados satisfatório para tamanhos de pixel de 10 metros. A projeção do desenvolvimento da vegetação foi representada de forma adequada para as cinco tipologias utilizadas. A utilização desta ferramenta para identificar futuros problemas ou áreas a serem assistidas dentro de uma planta de mineração é muito útil. O programa se mostrou muito completo para auxiliar no cálculo de matrizes de transições, simulação de cenários e na validação dos dados.

Os resultados obtidos para os cenários futuros foram harmônicas e a dinâmica das cinco tipologias utilizadas evoluíram de forma condizente com o observado, tendo algumas minas melhor desenvolvimento em um menor tempo de acordo com o tipo de substrato e idade dos plantios.

As minas Serra da Onça, Potosi e Santa Maria são as que menos evoluíram quando observado os cenários futuros para cada uma delas, isto está fortemente vinculado ao tipo de substrato que interfere na disponibilidade de nutrientes e na fixação da vegetação, sendo essas áreas as que mais necessitam investimento e enriquecimento de indivíduos vegetais para acelerar a fixação e recobrimento do solo.

Os resultados dos cenários obtidos neste estudo podem dar suporte a iniciativas de modelagem e simulação de cenários em outras áreas de minérios que estejam ou não sob um plano de recuperação de área degradada (PRAD).

6. AGRADECIMENTOS

A empresa Brascan Projetos de Recuperação Ambiental por ceder as cenas de satélites de alta resolução que deram subsídios para os 4 anos de estudo, além de dar suporte ao projeto. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos ao longo destes dois anos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, R. O. P. O.; SANCHEZ, L. E. **Revegetação de áreas de mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho.** Revista Árvore, v. 29, n.1, pag. 47-54, 2005
- ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J.; GARCON, E.; SILVA, G.D.; LOEBMANN, D.D.S.; VICENTE, L.; VICTORIA, D. **Monitoramento de processos de degradação de pastagens a partir de dados Spot Vegetation.** Campinas, EMBRAPA – Monitoramento por Satélite. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, dez. 2011
- ARAUJO, I. C. L.; DZIEDZIC, M.; MARANHO, L. T. **Management of the environmental restoration of degraded.** Braz. Arch. Biol. Technol. v.57 n.2: pp. 284-294, Mar/Apr 2014.
- BAASCH, A.; TISCHEW, S.; BRUELHEIDE, H. **Twelve years of succession on sandy substrates in a post-mining landscape: a Markov chain analysis.** Ecological Applications, v.20, n. 4, p. 1136-1147, 2010
- BARNI, P. E. **Reconstrução e asfaltamento da Rodovia BR-319: Efeito “dominó” pode elevar as taxas de desmatamento no Sul do Estado de Roraima.** Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais.) – INPA, Universidade Federal da Amazônia, 136f, Manaus, 2009.
- BENEDETTI, A. C. P. Tese – **Modelagem dinamica para simulações de mudança na cobertura florestal das serras do sudoeste e campanha meridional do rio Grande do Sul.** UFSM. Santa Maria, 2010
- BRANCALION, P. H. S.; RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. **Restauração florestal.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 432 p.
- BRASIL. **Projeto RADAMBRASIL.** Folha SC 20 Porto Velho, Rio de Janeiro, 1978. (Levantamento de Recursos Naturais, 16). Rio de Janeiro, 1978.
- BRASIL. LEI No 9.985. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC.** Brasília, 2000,
- BRASIL. **A importância econômica da mineração no Brasil.** Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 2010.
- BOHAN-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS.** Ed. Pergamon, *New York*, 1994
- BRITO, Y. D.; LOPES, A. G.; CRUZ, W. T. **Monitoramento e análise de uso e ocupação na microrregião de Vilhena-RO.** XIV ENEEAmb, II Fórum Latino e I SBEA – Centro Oeste, 2016
- CAMACHO-SANABRIA, J. M.; JUAN-PEREZ, J.I. ; PINEDA-JAIMES, N. B. **Modeling of land use/cover changes: prospective scenarios in the Estado de Mexico. Case study – Amanalco Bezerra.** Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, v.21, n.2, 2015.

- CANDIDO, A. K. A. A.; PARANHOS-FILHO, A. C. **Imagens de alta resolução e espacial de veículos aéreos não tripulados (VANT) no planejamento do uso e ocupação do solo.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, vol. 38 (1), pag. 147-156, 2015
- CARREIRAS, J. M. B.; JONES, J.; LUCAS, R. M.; GABRIEL, C. **Land use and land cover change dynamics across the Brazilian Amazon: insights from extensive time-series analysis of remote sensing data.** PLOS ONE, v. 9, n. 8, e104144, pag. 1-25, 2014
- CHAZDON, R. L. **Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances.** Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, v.6, p.51–71, 2003.
- CHAZDON, R. L.; LETCHER S. G.; VAN BREUGEL M.; MARTINEZ-RAMOS M.; BONGERS F.; FINEGAN B. **Rates of change in tree communities of secondary neotropical forests following major disturbances.** Philosophical Transactions of the Royal Society 326:273–289, 2007.
- CHAZDON, R. L. **Regeneração de florestas tropicais.** Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat., Belém, v. 7, n. 3, p. 195-218, 2012.
- COHEN, J. A. **Coefficient of agreement for nominal scales.** Educational and Measurement. Vol XX, n. 1, p. 37-46, 1960,
- ESPINDOLA, M. B. et al. **Recuperação ambiental e contaminação biológica: aspectos ecológicos e legais.** Biotemas. V. 18, n.1, p.27-38, 2005
- FENG, Y.; LU, D.; MORAN, E. F.; DUTRA, L. V.; CALVI, M. C.; OLIVEIRA, M. A. F. **Examining spacial and dynamic change of urban land covers in the brazilian amazon using multitemporal multisensor high spatial resolution satellite imagery.** Remote Sensing, v.6, 381, pag. 1-19, 2017
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** São Paulo: Oficina de Textos, 3ªed. p. 128, 2013
- FONTES, M. P. F. **Estudo pedológico reduz impacto da mineração.** Revista da Cetesb de Tecnologia AMBIENTE, São Paulo, p. 58-61, 1991.
- INPE. **Tutorial SPRING.** INPE, São José dos Campos, 2002.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de Uso da Terra.** Manuais técnicos em geociências, p. 171, 2013.
- GONÇALVES, R. M.; CENTENO, T. M.; CANDEIAS, A. L. **Autômatos celulares aplicados na modelagem de tendência em imagens multi-temporais.** Revista Bras. de Cartografia, n.63/02, p. 233-241, 2011.
- HAAPANEN, R.; TOKOLA, T. **Creating a digital treeless peatland map using image satellite interpretation.** Scandinavian Journal of Forest Research, v. 22, p. 48-59, 2007.
- HAGEN, A. **Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps.** Internacional Journal of Geography Information Science. V.17 n. 3, p.235-249, 2003

- JENSEN, J. R.; **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. 2ªEd. São José dos Campos, SP, Brasil: Parêntese, 2009. 598p.
- KAGEYAMA, P. Y.; GANDARA, F. B.; OLIVEIRA, R. E. **Biodiversidade e restauração da floresta tropical. Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu-SP. FEPAF, 0, 27-48, 2003
- KAWASHIMA, R. S.; GIANNOTTI, M. A.; QUINTANILHA, J. A. **Modelagem dinâmica espacial como ferramenta para simulação de cenários da paisagem na região portuária da baixada santista**. Boletim de Ciências Geodésicas, secção de artigos, v.22, n.4, p. 703-718, 2016
- KIRBY, K.R; LAURANCE F.W.; ALBERNAZ, A. K.; SCHROTH, G.; FEARNSTIDE, P.M; BERGEN, S.; VENTICINQUE, E. M.; da COSTA, C. **The future of deforestation in the Brazilian Amazon**. Futures, 38: 432–453, 2006.
- LEITE, E. F.; ROSA, R. **Análise do uso, ocupação e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins**. Revista Eletrônica de Geografia. v.4, n.12, p. 90-106, 2012.
- LILLESAND, THOMAS M; KIEFER, RALPH W; CHIPMAN, JONATHAN W. **Remote sensing and image interpretation**. 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, v.12, p. 441-587, 2008.
- LONGO, R.M.; RIBEIRO, A. I.; MELO, W. J. **Caracterização física e química de áreas mineradas pela extração de cassiterita**. Bragantia, Campinas, v.64, n.1, p.101-107, 2005.
- LONGO, R.M.; RIBEIRO, A. I.; MELO, W. J. **Uso da adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica**. Bragantia, Campinas, v. 70, n. 1, p.139-146, 2011.
- LOPES, H. et al. **Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.11, pag. 1210-1219, 2010
- MACEDO, R. C.; ALMEIDA, C. M.; RUDORFF, B. F. T. **Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira**. Boletim de Ciências Geodésicas, secção de artigos, v. 19, n.2, p. 313-337, 2013
- MAEDA, E. E. et al. **Dynamic Modelling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities in the fringes of Xingu nacional park, brazilian Amazon**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. V. 13, p. 435-446, 2011
- MARGULIS, S. **Causas do desmatamento da Amazônia brasileira**. Banco Mundial, Brasília, Estação Gráfica, 2003.
- MARTINS, T. I .S.; RODRIGUES, S. C. **Ocupação e uso da terra na bacia do médio-baixo curso do rio Araguari/MG**. Bol. geogr., Maringá, v. 30, n. 1, p. 55-68, 2012.
- MASCARENHAS, L. M. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G. **Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio Araguaia**. Sociedade & Natureza vol. 21(1), pag. 5-18, 2009.

- MASSOCA, P. E. S. et al. **Dinâmica espaço-temporal da vegetação secundária no município de Apuí (AM)**. Anais 16º Simpósio de Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 7639-7646, 2013.
- MLADENOFF, D. J. **Landis and forest landscape models**. Ecological Modelling. V. 180, Jan. p. 7-19, 2004
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos campos-SP: INPE, 2001.
- MYADA, M. M. et al. **Atributos químicos e bioquímico em solos degradados por mineração em ecossistema amazônico**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 39, p. 714-724, 2015.
- NASCIMENTO, N.; GERHAR, P.; WATRIN, O. S. **Análise comparativa de cenários futuros de uso da terra no nordeste paraense**. Anais 16º Simpósio de Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 6837-6844, 2013.
- NEPSTAD, D., UHL, C., SERRÃO, E. A. **Recuperation of a degraded Amazonian landscape: forest recovery and agricultural restoration**. Ambio, V. 20, p. 248-255, 1991.
- NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 4ªed. p. 387, 2010,
- NUMATA, I.; COCHRANE, M. A.; ROBERTS, D. A.; SOARES, J. V. **Determining dynamics os spacial and temporal structures of forest edges in south western Amazonia**. Foreste Wcology and Management, v. 258, pag. 2547-2555, 2009
- NUNES, A. B.; LEITE, E. F. **Geoprocessamento aplicado à determinação do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Areias**. In. Anais de Geotecnologias no Pantanal, Embrapa Informatica Agropecuaria/INPE, pag. 122-128, 2014
- PERRY, G. L. W.; ENRIGHT, N. J. **Spatial modelling of vegetation change in dynamic landscapes: a review os methods and applications**. Progress in Physical Geography. V. 30, p. 47-72, 2006.
- OPENSHAW, S. **GeoComputation**. ed. Geocomputation. New York: Taylor & Francis, Cap. 1, p. 1-31, 2000,
- OZDOGAN, M. **A Practical and Automated Approach to Large Area Forest Disturbance Mapping with Remote Sensing**. Plos One, v.9, n. 4, p. 2014 (acessado em 06/09/2015 em: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0078438>)
- PIONTEKOWSKI, J. V. et al. **Modelagem do desmatamento para o Estado do Acre utilizando o programa DINÂMICA-EGO**. Anais 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, p. 1066-1075, 2012
- PIONTEKOWSKI, J. V. **Modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra do estado de Rondônia até 2050**. Dissertação de Mestrado. UNB, 90p. 2014
- POZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M.. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2ªed, Ed. Oficina de Textos, 2012.

- ROSSETTI, L. A. F. G.; ALMEIDA, C. M.; PINTO, S. A. F. **Análise de mudanças do uso do solo urbano e rural com aplicação de modelagem dinâmica espacial**. Anais 5º Simpósio de Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 6316-6323, 2012
- REIS, A.; ZAMBONIN, R. M.; NAKAZONO, E. M. **Recuperação de áreas florestais degradadas utilizando a sucessão e as interações planta-animal**. Série Cadernos da Biosfera, Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, v.14, São Paulo, 1999
- RIBEIRO, A. I. Tese - **Mecanização no preparo de solo em áreas degradadas por mineração na floresta nacional do Jamari (Rondônia - BR)**. FEABRI. Campinas, 2005
- RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W.L. S. **Dinâmica ego, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais**. Anais 13º Simpósio de Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 3089-3096, 2007
- RODRIGUES, M. T. et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao uso da terra para avaliação entre classificadores a partir do índice kappa**. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal. v. 23, n.1, 2014
- ROSA, I. M. D. et al. **Modelling land cover change in the Brazilian Amazon: temporal changes in drivers and calibration issues**. Reg. Environ Change, v. 15, pag. 123-137, 2015
- SALOMÃO, R. P.; ROSA, N. A.; MORAES, K. A. C. **Dinâmica da regeneração natural de árvores em áreas mineradas na Amazônia**. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Naturais, Belém, v. 2, n. 2, p.85-139, mai-ago. 2007
- SCHRODER, T.; PEREIRA, R. S.; ZIMMERMANN, A. P. L.; REDIN, C. G.; FLECK, M. D.; MACHADO, L. M. M.; ROCHA, N. S. **Dinâmica do uso e cobertura do solo no vale do Rio Pardo, Rio Grande do Sul**. Reget – Revista Eletrônica em gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v.20, n. 1, p.372-380, 2016
- SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G.C.; PENNACHIN, C. L. **DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier**. Ecol Model v. 154, p. 217-235, 2002.
- SOARES-FILHO, B.; DIETZSCH, L., **Reduction of Carbon Emissions associated with deforestation in Brazil: The Role of the Amazon Region Protected Areas Program (ARPA)**. Brasilia: World Wide Foundation, 2008. 32p.
- SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. S. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinamica**. Guia prático do Dinamica Ego, Centro de Sensoriamento Remoto/UFMG. 2015.
- SOARES-FILHO, B. S. et al. **Modeling conservation in the Amazon basin**. Nature, v. 440, p. 520-523, 2006.
- SONTER, L. J.; BARRET, D. J.; SOARES-FILHO, B. S. **Offsetting the impacts of mining to achieve no net**. Conservation Biology, Volume 00, N. 0, p.1-9 , 2014

SOUZA, R. A.; MARCO-JUNIOR, P. **The use of species distribution models to predict the spacial distribution deforestation in the western Brazilian Amazon.** Ecological Modelling, V. 291, p. 250-259, 2014

SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. **Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems.** Restoration Ecology – V. 23, Issue 3, pages 238–251, 2015

VASCONCELOS, S. S et al. **Forest fires in southwestern brazilian Amazonia: estimates of are and potencial carbono emissions.** For Ecology and Managent v. 291, p. 199-208, 2013

VITEL, C. S. M. N.; FEARNside, P. M.; GRAÇA, P; M; L. **Análise da inibição do desmatamento pelas áreas protegidas na parte sudoeste do arco de desmatamento.** Anais 14^o Simpósio de Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 6377-6384, 2009

TEXEIRA, A. M. G. et al. **Modeling landsacap dynamics in an Atlantic Rainforest region: Implications for conservation.** Forest Ecology and Management. V. 257, p. 1219-1230, 2009

XIMENES, A. C. et al. **Modelagem dinâmica do desmatamento na Amazônia.** Boletim de Ciências Geodésicas, seção de artigos, v.14, n.3, p. 370-391, 2008

WOLFRAM, S. **Statistical mechanics of cellular automata.** Review of Modern Physics, v. 55, p. 601-643, 1983.

8. ANEXOS

Tabela 1A - Matriz de transição global de conversão das áreas das minas no período de 2009 a 2011.

De/ Para	Taxa
Solo Exposto / Campo Sujo	0,1043
Solo Exposto / Vegetação Rala	0,0585
Solo Exposto / Vegetação Intermediária	0,0604
Solo Exposto / Vegetação Densa	0,0108
Solo Exposto / Plantio de Mudas	0,0257
Campo Sujo / Solo Exposto	0,0870
Campo Sujo / Vegetação Rala	0,1114
Campo Sujo / Vegetação Intermediária	0,2012
Campo Sujo / Vegetação Densa	0,0332
Campo Sujo / Plantio de Mudas	0,0563
Vegetação Rala / Solo Exposto	0,0270
Vegetação Rala / Campo Sujo	0,0230
Vegetação Rala / Vegetação Intermediária	0,3317
Vegetação Rala / Vegetação Densa	0,0300
Vegetação Rala / Plantio de Mudas	0,0040
Vegetação Intermediária / Solo Exposto	0,0158
Vegetação Intermediária / Campo Sujo	0,0042
Vegetação Intermediária / Vegetação Rala	0,0112
Vegetação Intermediária / Vegetação Densa	0,1266
Vegetação Intermediária / Plantio de Mudas	0,0001
Vegetação Densa / Solo Exposto	0,0123
Vegetação Densa / Campo Sujo	0,0184
Vegetação Densa / Vegetação Rala	0,0300
Vegetação Densa / Vegetação Intermediária	0,0530
Vegetação Densa / Plantio de Mudas	0,0010
Plantio de Mudas / Solo Exposto	0,0625
Plantio de Mudas / Vegetação Intermediária	0,9375

Tabela 2A - Matriz de transição global de conversão das áreas das minas no período de 2011 a 2013.

De/ Para	Taxa
Solo Exposto / Campo Sujo	0,4179
Solo Exposto / Vegetação Rala	0,0376
Solo Exposto / Vegetação Intermediária	0,0288
Solo Exposto / Vegetação Densa	0,0242
Solo Exposto / Plantio de Mudás	0,2418
Campo Sujo / Solo Exposto	0,0036
Campo Sujo / Vegetação Rala	0,0784
Campo Sujo / Vegetação Intermediária	0,0288
Campo Sujo / Vegetação Densa	0,0076
Campo Sujo / Plantio de Mudás	0,2529
Vegetação Rala / Solo Exposto	0,0079
Vegetação Rala / Campo Sujo	0,0513
Vegetação Rala / Vegetação Intermediária	0,3228
Vegetação Rala / Vegetação Densa	0,0919
Vegetação Rala / Plantio de Mudás	0,0813
Vegetação Intermediária / Solo Exposto	0,0059
Vegetação Intermediária / Campo Sujo	0,2752
Vegetação Intermediária / Vegetação Rala	0,1406
Vegetação Intermediária / Vegetação Densa	0,3433
Vegetação Intermediária / Plantio de Mudás	0,0301
Vegetação Densa / Solo Exposto	0,0020
Vegetação Densa / Campo Sujo	0,0356
Vegetação Densa / Vegetação Rala	0,0184
Vegetação Densa / Vegetação Intermediária	0,1586
Vegetação Densa / Plantio de Mudás	0,0104
Plantio de Mudás / Campo Sujo	0,1229
Plantio de Mudás / Vegetação Rala	0,0801
Plantio de Mudás / Vegetação Intermediária	0,1271
Plantio de Mudás / Vegetação Densa	0,1017

Tabela 3A - Matriz de transição global de conversão das áreas das minas no período de 2013 a 2015.

De / Para	Taxa
Solo Exposto / Campo Sujo	0,6517
Solo Exposto / Vegetação Rala	0,1185
Solo Exposto / Vegetação Intermediária	0,0087
Solo Exposto / Vegetação Densa	0,0805
Solo Exposto / Plantio De Mudás	0,0194
Campo Sujo / Solo Exposto	0,0020
Campo Sujo / Vegetação Rala	0,2471
Campo Sujo / Vegetação Intermediária	0,0637
Campo Sujo / Vegetação Densa	0,0147
Campo Sujo / Plantio De Mudás	0,0016
Vegetação Rala / Solo Exposto	0,0024
Vegetação Rala / Campo Sujo	0,0302
Vegetação Rala / Vegetação Intermediária	0,1199
Vegetação Rala / Vegetação Densa	0,3664
Vegetação Rala / Plantio De Mudás	0,0000
Vegetação Intermediária / Solo Exposto	0,0000
Vegetação Intermediária / Campo Sujo	0,0187
Vegetação Intermediária / Vegetação Rala	0,0272
Vegetação Intermediária / Vegetação Densa	0,7470
Vegetação Densa / Solo Exposto	0,0020
Vegetação Densa / Campo Sujo	0,0061
Vegetação Densa / Vegetação Rala	0,0219
Vegetação Densa / Vegetação Intermediária	0,0627
Plantio De Mudás / Solo Exposto	0,0026
Plantio De Mudás / Campo Sujo	0,1646
Plantio De Mudás / Vegetação Rala	0,4549
Plantio De Mudás / Vegetação Intermediária	0,1103
Plantio De Mudás / Vegetação Densa	0,2128