

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
CAMPUS DE TRÊS LAGOAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DIEGO RIBEIRO OQUENDO CABRERO

**MODELAGEM PREDITIVA DA EXPANSÃO DA MALHA URBANA NA  
FRONTEIRA BRASIL-BOLÍVIA (1975-2060).**

TRÊS LAGOAS, MS

2021

DIEGO RIBEIRO OQUENDO CABRERO

**MODELAGEM PREDITIVA DA EXPANSÃO DA MALHA URBANA NA  
FRONTEIRA BRASIL-BOLÍVIA (1975-2060)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Geografia do Campus de Três Lagoas da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito para o Título de Mestre em Geografia, sob a orientação do Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani

TRÊS LAGOAS, MS

2021

FOLHA DE APROVAÇÃO

DIEGO RIBEIRO OQUENDO CABRERO

**MODELAGEM PREDITIVA DA EXPANSÃO DA MALHA URBANA NA  
FRONTEIRA BRASIL-BOLÍVIA (1975-2060)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Geografia do Campus de Três Lagoas da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito para o Título de Mestre em Geografia, sob a orientação do Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani.

Resultado: \_\_\_\_\_

Três Lagoas, MS, 30 de março de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/CPTL

---

Titular: Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima  
Universidade Estadual Paulista/FEIS

---

Titular: Prof. Dra. Patrícia Helena Milani  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/CPTL

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Izabel e José Roberto por todo o esforço para manterem minha motivação e interesse pelo estudo, pela contribuição financeira e psicológica durante toda esta jornada. Vocês são minhas inspirações e uma das minhas motivações em sempre buscar algo melhor, espero retribuir tudo que fizeram e fazem por mim.

Agradeço a minha amada Maria Rita que esteve ao meu lado com muito carinho e compreensão. Pela paciência nos momentos de maior tensão e por entender a minha ausência em diversos períodos. Você me impulsiona a buscar ser uma pessoa e profissional melhor.

Agradeço aos amigos Prof. Dr. Mauro Henrique Soares da Silva e Prof. Dra. Marine Dubos-Raoul pelo incentivo para ingressar neste mestrado, por acreditarem no meu potencial mesmo nos momentos em que estava desacreditado e por me abrigarem na sua casa quando foi necessário. Tenho vocês como espelho profissional e pessoal, minha eterna gratidão por tudo.

Agradeço ao meu irmão Pedro Cabrero pela contribuição nas revisões do Abstract, pelas revisões de textos na língua inglesa, e que mesmo a distância sempre manteve carinho e admiração pelo meu trabalho. Agradeço também aos meus primos Danilo, Miscão, Gustavo, Murilo, Guilherme e Rafael por todos os momentos de descontração e felicidade que reduziram a tensão na execução deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani, pela orientação, amizade e todo o conhecimento compartilhado neste trabalho. E ainda por toda a paciência e compreensão nos momentos de maior dificuldade no decorrer desta jornada, tenho uma enorme gratidão.

Gostaria também de agradecer a disponibilidade e contribuições para este trabalho do Prof. Dr. Aguinaldo Silva e da Prof. Dra. Patrícia Helena Milani durante o exame de qualificação.

Agradeço aos amigos Hermiliano, Edson, Vincler, Erivelton, Bruno, Vitor, Milto e Regiane por todas discussões acadêmicas e discussões que contribuíram para a minha evolução neste período.

Agradecimento ao apoio financeiro da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e ao apoio institucional da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Três Lagoas.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus avós  
Juvenal e Maria (In Memoriam) pelos  
ensinamentos que não são encontrados  
nos livros, e mostrar como podemos ser  
felizes com coisas simples.*

## RESUMO

A região fronteira de Corumbá-MS está localizada entre o Brasil e a Bolívia sendo formada também pela cidade brasileira de Ladário-MS e as cidades bolivianas de Puerto Quijarro e Puerto Suarez. A região possui um grande processo de integração entre os dois lados da fronteira com circulação de pessoas e mercadorias constantes, outra característica comum é a presença do Pantanal que possui forte influência na espacialização dos corpos hídricos e áreas úmidas nesta região. Para definir a área de estudo deste trabalho foi realizado um recorte na área dos municípios com a criação de um buffer de 8 km a partir da sede dos municípios. O objetivo deste trabalho foi analisar as mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra entre os anos de 1975, 1985, 1994, 2005 e 2017 e simular o cenário futuro para o ano de 2060 com modelagem para a área de estudo na região fronteira de Corumbá-MS com foco na expansão da Área Construída. Para o processo de análise multitemporal das alterações na paisagem foi utilizado o método de classificação orientada ao objeto (GEOBIA – Geographic Object Based Image Analysis), enquanto para a modelagem preditiva para o uso e cobertura da terra no ano de 2060 aplicamos o método de CA-Markov (Cadeia de Markov e Autômatos Celulares) conjuntamente a técnica de análise multicritério. Foram definidas 5 classes temáticas: Corpos Hídricos, Áreas Úmidas, Vegetação, Agropecuária e Área Construída, sendo que as duas primeiras não foram utilizadas na modelagem preditiva devido as características sazonais que alteram sua espacialização e por não interferir no objetivo da pesquisa. A validação do mapeamento foi calculada pelo índice *Kappa* que apresentou resultados excelentes superiores a 0.8. Os resultados da análise multitemporal demonstraram que a expansão da Área Construída ocorreu principalmente substituindo áreas de Agropecuária, no entanto também chamou a atenção a recuperação de áreas de Vegetação no intervalo entre 2005-2017 decorrentes de processos de regeneração com influência antrópica. A calibração do modelo para o ano de 2060 apresentou índice *Kappa Standard* de 0.8275 classificado como excelente, o que permite a utilização em modelos preditivos. Os resultados da simulação apresentaram uma redução no processo de expansão de Áreas Construídas e a manutenção da tendência de conversão de áreas de Agropecuária. As cidades bolivianas de Puerto Suarez e Puerto Quijarro possuem previsão de maior expansão percentual e quantitativa na região fronteira.

**Palavras Chave:** Classificação Orientada ao Objeto; Cadeia de Markov; Autômatos Celulares; Região fronteira de Corumbá.

## ABSTRACT

The border region of Corumbá-MS is located between Brazil and Bolivia and is also formed by the Brazilian city of Ladário-MS, the Bolivian cities of Puerto Quijarro and Puerto Suarez, the region has a great process of integration between the two sides of the border with constant circulation of people and goods, another common feature is the presence of the Pantanal, which has a strong influence on the spatialization of water bodies and wetlands in this region. To define the study area of this work, a cut was made in the area of the municipalities with the creation of a buffer of 8 km from the headquarters of the municipalities. The objective of this work was to analyze the changes that occurred in land use and coverage between 1975, 1985, 1994, 2005 and 2017 and simulate the future scenario for the year 2060 with modeling for the study area in the border region of Corumbá- MS with a focus on the expansion of the Built Area. For the process of multitemporal analysis of changes in the landscape, the object oriented classification method (GEOBIA - Geographic Object Based Image Analysis) was used, while for the predictive modeling for land use and coverage in the year 2060, we applied the CA method - Markov (Chain Markov and Cellular Automata) the multicriteria analysis technique. Five thematic classes were defined: Water Bodies, Wetlands, Vegetation, Agriculture and Built Area, the first two of which were not used in predictive modeling due to the seasonal characteristics that alter their spatialization and because they do not interfere with the research objective. The mapping validation was calculated using the Kappa index, which showed excellent results greater than 0.8. The results of the multitemporal analysis showed that the expansion of the Built Area occurred mainly replacing areas of Agriculture however it also drew attention to the recovery of Vegetation areas in the interval between 2005-2017 due to regeneration processes with anthropic influence. The calibration of the model for the year 2060 presented a Kappa Standard index of 0.8275 classified as excellent, which allows its use in predictive models. The simulation results showed a reduction in the expansion process of Built Areas and the maintenance of the trend of conversion of areas of Agriculture. The Bolivian cities of Puerto Suarez and Puerto Quijarro are forecast to have greater percentage and quantitative expansion in the border region.

**Keywords:** Object Oriented Classification, Markov chain, Cellular Automata, Border region of Corumbá.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Requisitos para modelagem dinâmica. ....	20
<b>Figura 2</b> – Aplicação da amostragem aleatória estratificada.....	27
<b>Figura 3</b> – Componentes para aplicação do autômato celular.....	32
<b>Figura 4</b> – Estrutura hierárquica de problemas de decisão.....	33
<b>Figura 5</b> – Localização da área de estudo.....	35
<b>Figura 6</b> – Galerias de comércio varejista de roupas em Puerto Quijarro.....	38
<b>Figura 7</b> – População nos municípios da região fronteira de Corumbá.....	39
<b>Figura 8</b> – Exemplos de segmentação para imagens Landsat 5/TM e Landsat 8/OLI.....	47
<b>Figura 9</b> – Fluxograma metodológico para elaboração do modelo preditivo.....	49
<b>Figura 10</b> – Mapa de distância euclidiana das vias de acesso na área de estudo. ....	50
<b>Figura 11</b> – Valores utilizados no método AHP com a ferramenta Weight.....	51
<b>Figura 12</b> – Representação da classe temática Agropecuária.....	55
<b>Figura 13</b> – Representação da classe temática Área Úmida.....	59
<b>Figura 14</b> – Mapeamento das classes de uso e cobertura da terra.....	61
<b>Figura 15</b> – Representação em percentual dos valores para análise multitemporal de uso e cobertura no período entre 1975-2017. ....	62
<b>Figura 16</b> - Representação de área com processo de regeneração da vegetação.....	65
<b>Figura 17</b> – Classificação das cheias em Ladário-MS entre 1900 e 2009.....	66
<b>Figura 19</b> – Comparação entre mapa simulado e real para o ano de 2017.....	67
<b>Figura 19</b> – Evolução espacial da área de estudo nos anos de 1975, 1985, 1994, 2005, 2017 e 2060. ....	68
<b>Figura 20</b> – Área em km <sup>2</sup> das classes de uso da terra e cobertura para o período 1975-2060.....	70
<b>Figura 21</b> - Comparativo da expansão da Área Construída nos anos de 1975, 1985, 1994, 2005, 2017 e 2060. ....	72

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Características chaves dos modelos de simulação espaciais. ....	22
<b>Tabela 2</b> – Escala numérica de Saaty. ....	34
<b>Tabela 3</b> – Relação das cenas da coleção Landsat utilizadas. ....	40
<b>Tabela 4</b> – Chaves de interpretação para os anos de 1975, 1985, 1994, 2005 e 2017.....	44
<b>Tabela 5</b> – Valores de relevância para cada banda do Landsat 2/MSS, Landsat-5/TM e Landsat-8/OLI. ....	46
<b>Tabela 6</b> – Valores de Escala, Forma e Compacidade utilizados no processo de segmentação. ....	46
<b>Tabela 7</b> – Parâmetros aplicados ao classificador NN.....	47
<b>Tabela 8</b> – Resultados do cálculo do coeficiente Kappa e Acurácia Global para o mapeamento de uso da terra e cobertura vegetal. ....	54
<b>Tabela 9</b> – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 1975.....	54
<b>Tabela 10</b> – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 1975. ....	56
<b>Tabela 11</b> – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 1985.....	56
<b>Tabela 12</b> – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 1985. ....	57
<b>Tabela 13</b> – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 1994.....	57
<b>Tabela 14</b> – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 1994. ....	58
<b>Tabela 15</b> – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2005.....	58
<b>Tabela 16</b> – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 2005. ....	58
<b>Tabela 17</b> – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre o ano de 2017. ....	59
<b>Tabela 18</b> – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 2017. ....	60
<b>Tabela 19</b> – Evolução espacial da área ocupada pelas classes temáticas em km <sup>2</sup> e % por lado da fronteira.....	63

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Classificação dos modelos de acordo com as tipologias.....	21
<b>Quadro 2</b> – Estratégias de coleta de amostras para validação.....	26
<b>Quadro 3</b> – Escala de avaliação do índice <i>Kappa</i> . ....	29
<b>Quadro 4</b> – Descrição das características das coleções de imagens do USGS. ....	40
<b>Quadro 5</b> – Representação das classes temáticas. ....	42
<b>Quadro 6</b> - Matriz de probabilidade de transição das classes temáticas no período 1994-2005. .....	52
<b>Quadro 7</b> – Composição de imagens do <i>Raster Group</i> .....	53

## **LISTA DE SIGLAS**

**AC** – Autômato Celular

**AHP** - *Analytic Hierarchy Process*

**CA-MARKOV** – *Cellular Automata Markov*

**DSS** - *Decision Support Systems Glossary*

**FLAASH** - *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*

**GEOBIA** - *Geographic-Object-Based Image Analysis*

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**LANDSAT** - *Land Remote Sensing Satellite*

**MODTRAN** – *Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance*

**NASA** – *National Aeronautics and Space Administration*

**NDBI** - *Normalized Difference Build-up Index*

**NDVI** - *Normalized Difference Vegetation Index*

**NDWI** - *Normalized Difference Water Index*

**SIG** - Sistema de Informação Geográfica

**OBIA** - *Object-Based Image Analysis*

**OLI** - *Operational Land Imager*

**TM** – *Thematic Mapper*

**USGS** - *United State Geological Survey*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos .....	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO .....	17
3.1 O processo de conurbação em áreas urbanas.....	17
3.2 Modelagem dinâmica de ambientes urbanos .....	18
3.3 Classificação do uso e cobertura da terra e o método GEOBIA.....	22
3.4 Segmentação de imagem e o classificador “ <i>Nearest Neighbor (NN)</i> ” .....	24
3.5 Validação estatística – Exatidão global e índice Kappa .....	25
3.6 Modelagem Preditiva – Cadeias de Markov e Autômatos Celulares .....	29
4.7 AHP – Processo Analítico Hierárquico ( <i>Analysis Hierarchy Process</i> ).....	33
4. METODOLOGIA.....	35
4.1 Caracterização da área de estudo .....	35
4.1.1 Histórico de ocupação da região fronteiriça e dinâmicas populacionais .....	36
4.2 Etapa inicial: aquisição de dados e delimitação da área de estudo .....	39
4.3 Definição das classes temáticas .....	41
4.4 Pré-processamento das Imagens: 1975, 1985, 1994, 2005, 2017 .....	43
4.5 Chave de interpretação das imagens .....	44
4.6 Segmentação das imagens.....	45
4.7 Classificação orientada a objeto .....	47
4.8 Validação estatística: acurácia global e estatística Kappa .....	48
4.9 Modelagem preditiva de uso e cobertura da terra.....	48
4.9.2 Agentes Modificadores .....	49
4.9.3 Método AHP e Análise multicriterial.....	50
4.9.4 Elaboração e calibração do modelo CA Markov .....	51
4.9.5 Simulação do cenário preditivo para 2060.....	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	54
5.1 Avaliação do desempenho do mapeamento multitemporal de uso e cobertura da terra .....	54
5.2 Análise multitemporal de uso e cobertura da terra .....	60
5.3 Modelagem preditiva para o ano de 2060.....	66
5.3.1 Calibração e validação do modelo. ....	66
5.3.2 Mapeamento preditivo de uso e cobertura da terra para o ano de 2060.....	67
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	74

REFERÊNCIAS .....	76
-------------------	----

## 1. INTRODUÇÃO

A fronteira adquire funções para a qual foi determinada, sendo a função legal, para delimitar uma área onde prevalece um conjunto de instituições jurídicas e normas que regulamentam uma sociedade política; a função de controle, para inspecionar o fluxo de mercadorias e pessoas; além da função militar. Dessa forma, a fronteira adquire um significado político e administrativo que delimita um território onde prevalecem determinadas leis e instituições públicas (RAFFESTIN, 1993). Essas características acabam interferindo na formação espacial no entorno da fronteira, com atração ou repulsão de pessoas e atividades econômicas.

A fronteira do Brasil com a Bolívia possui uma extensão de 3.423 km passando pelos estados do Acre, Rondônia, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e 21 municípios, e dentre elas destaca-se a cidade de Corumbá-MS, a última cidade ao sul da fronteira entre os países, formando nessa região um arranjo populacional de fronteira com as cidades de Ladário, Puerto Quijarro e Puerto Suarez (IBGE, 2016). Neste arranjo temos 151.432 habitantes dos quais 123.320 residem no Brasil e 28.112 são moradores da Bolívia. Essa população está assim distribuída: Corumbá, 103.703 habitantes (68%); Ladário, 19.617 habitantes (19%); Puerto Suarez, 15.209 (10%) e Puerto Quijarro 12.903 (9%) (IBGE, 2016).

Por outro lado, Pereira e Pereira (2011) destacam que o processo de crescimento urbano em Corumbá ocorreu de maneira desordenada sendo ocupadas também áreas de fundos de vales e encostas com alta declividade, e isso atualmente representa para o poder público constantes prejuízos ambientais como alagamentos e deslizamentos de encostas, geram impactos sociais para a população residente nessas áreas, bem como prejuízos econômicos com a utilização de recursos financeiros na recuperação destes espaços. Essas características evidenciam a necessidade de estudos sobre a expansão malha urbana e planejamento territorial regional para os próximos anos.

Os primeiros estudos sobre o crescimento de áreas urbanas tiveram dificuldades na aquisição de dados através das técnicas mais tradicionais, pois isso implicava dificuldade na execução e oneravam os custos das pesquisas, no entanto com o lançamento dos satélites da família Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) puderam obter dados com series históricas, visão sinótica e com cobertura sobre extensas áreas contribuindo para o aumento das pesquisas nessa temática. Esses produtos permitiram análises históricas sobre as alterações no

uso e cobertura da terra, como também permitiram a elaboração de modelos preditivos (ALVES et al., 2009).

A elaboração de modelos para previsão consiste em importante ferramenta para o planejamento, visto que, permite entender onde e quando aconteceram alterações no uso e cobertura da terra reduzindo seus impactos na sociedade e natureza (GONG et al., 2015). Nos últimos anos vemos progresso no uso de modelos para analisar questões urbanas e fornecer alternativas para o planejamento como os trabalhos na literatura nacional de Almeida, Monteiro e Câmara (2005), Araya e Cabral (2010), Gong et al. (2015), Ribocom e Caneparo (2017), Siddiqui et al. (2017).

Nas últimas décadas diversos trabalhos empregaram a técnica CA Markov para modelagem preditiva de alterações no uso e cobertura da terra como Almeida et al. (2003), Silva (2017), Vick (2019). O aumento da aplicação destas técnicas de geoprocessamento para o mapeamento de uso e cobertura da terra tem permitido a compreensão temporal das mudanças espaciais com baixo custo de investimento, juntamente com a evolução dos Sistemas de Informação Geográfica.

A definição da fronteira Brasil-Bolívia, com enfoque na cidade de Corumbá para a realização desta pesquisa se justifica devido às particularidades que influenciam a expansão da malha urbana em ambos lados da fronteira, nesse sentido ressalta-se as seguintes características: ambiental (ambientes vulneráveis – como morrarias e as áreas úmidas do Pantanal), espacial (região de fronteira internacional) e socioeconômica (principal porto seco da região, mineração, fluxo comercial e de pessoas entre as cidades).

Dessa forma, analisar o processo de formação espacial na região fronteira de Corumbá e suas conseqüentes alterações no uso e cobertura da terra ao longo desse período permitem compreender uma parcela dos resultados produzidos pela relação entre sociedade e natureza, que neste estudo são visíveis na malha urbana. Assim é possível realizar a predição de cenários futuros com as tendências de alterações espaciais caso se mantenham os processos atuais.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Simulação de cenário futuro de uso e cobertura da terra para a região fronteira de Corumbá-MS no ano de 2060 com técnicas de modelagem.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a evolução do uso e cobertura da terra para os anos de 1975, 1985, 1994, 2005 e 2017 através de técnicas de classificação orientada a objetos.
- Elaborar ferramentas para análise das formas do processo embrionário de conurbação entre as cidades de Corumbá-Ladário - Puerto Quijarro - Puerto Suarez.
- Elaborar um modelo preditivo com enfoque para a área construída aplicando as técnicas CA-Markov e método AHP para o ano de 2060.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO**

#### **3.1 O processo de conurbação em áreas urbanas**

Para Tessari (2009) na Geografia a utilização do termo conurbação é pouco recorrente nos trabalhos científicos nas últimas décadas. Neste sentido, levanta a hipótese que a redução no uso deste termo está relacionada com a evolução do pensamento geográfico e o fortalecimento da Geografia Crítica, visto que, segundo a autora a aproximação com a dialética marxista diminuiu o interesse por temas de cunho regional e interurbanos, e por outro lado, buscou-se uma análise espacial da estrutura urbana pela perspectiva das discussões sobre as lutas de classes manifestadas na cidade.

A utilização do termo conurbação tem seu primeiro registro entre o final do século XIX e início do século XX, em que Patrick Gueddes ao estudar o processo de crescimento urbano entre Londres e Edimburgo, propôs explicar o fenômeno em que distintos núcleos urbanos se fundem formando um único aglomerado maior, no entanto, cada um dos núcleos mantém sua própria estruturação social, política e administrativa. Na década de 1960, Peter Hall, investigou o processo de conurbação na Alemanha em Reno-Rhur e também na Holanda em Randstad. Dessa forma, o termo passou a ser associado ao processo de metropolização e a expansão de grandes áreas urbanas (TESSARI, 2009).

No Brasil o processo de conurbação começa em meados da década de 1920, nas cidades de São Paulo e do Rio de Janeiro com as respectivas cidades circunvizinhas, devido ao intenso crescimento populacional decorrentes do processo de urbanização e industrialização ocorrido no país, posteriormente surgem no território brasileiro inúmeras conurbações em regiões que não são consideradas metropolitanas, entretanto ainda são poucos os trabalhos científicos com análises geográficas sobre estas regiões (SANTOS; PEIXINHO, 20015).

O processo de conurbação segundo definição de Villaça (2001) ocorre quando uma cidade passa a absorver outros núcleos urbanos no seu entorno, pertencendo ou não a outro município vizinho. Esse processo de absorção ocorre quando uma cidade passa a desenvolver uma intensa vinculação socioeconômica com os núcleos urbanos vizinhos. Santos e Peixinho (2015) definem o processo de conurbação como um fenômeno urbano decorrente da expansão urbana que acontece em grandes aglomerados urbanos, em que as metrópoles se expandem sobre o as cidades vizinhas, no entanto, admitem que recentemente as pesquisas consideram

esse processo em áreas não metropolitanas como em Barra do Garças e Pontal do Araguaia, no Mato Grosso, e Aragarças, em Goiás.

Para Polidoro (2011) o modelo linear e horizontal de expansão urbana, em que malha urbana é difusa contribui para a ocorrência do processo de conurbação, e afirma que este processo resulta em problemas para o planejamento regional, uma vez que, as legislações e regulamentações para uso do solo urbano, loteamentos e sistema viários devem ser alteradas para considerar o conjunto de municípios, e isto muitas vezes implica em conflitos de jurisdição, gerando dificuldade na articulação de instrumentos de planejamento urbano e acabam dessa forma criando vazios de gestão com falta de infraestrutura e serviços públicos.

Desta forma, entende-se que o processo de conurbação está além da proximidade física entre dois núcleos urbanos que levam a uma continuidade do tecido urbano. Devemos considerar os aspectos sociais e econômicos que são estabelecidos através de constantes interações espaciais, com fluxos diários de pessoas e mercadorias (VILLAÇA, 2001), porém esses aspectos não foram tratados no trabalho, pois mantivemos o enfoque nas técnicas de mapeamento, o que pode subsidiar pesquisas futuras.

### **3.2 Modelagem dinâmica de ambientes urbanos**

Devido à capacidade de realizar medições em diferentes escalas os produtos de sensoriamento remoto ganharam espaço nos estudos sobre os ambientes urbanos, e nesse sentido, podem oferecer aos agentes públicos informações necessárias para análise urbana como a extensão espacial, a localização destas áreas, a distribuição dos diversos usos do solo, redes de transportes, evolução temporal do uso e cobertura do solo, entre outros (RIBEIRO; KUX, 2009).

No surgimento dos primeiros SIG (Sistema de Informação Geográfica), pouco se discutia sobre a representação específica nos modelos de dados, de entidades geográficas ou espaciais. Para Borges e Davis (2003) a modelagem do mundo real trata-se de uma atividade complexa, pois para sua adequada representação é necessária uma discretização do espaço geográfico, e isso, envolve diversos fatores como a transcrição da informação geográfica em unidades lógicas de dados, a forma como as pessoas percebem o espaço, a natureza diversificada dos dados geográficos, a existência de relações espaciais e a coexistência de entidades essenciais ao processamento e entidades cartográficas.

Os primeiros estudos de modelagem sobre a área urbana surgiram nos Estados Unidos no final da década de 1950, impulsionado pela necessidade de planejamento sistemático e

preditivo no sistema de transportes. Algumas circunstâncias como, o crescimento dos congestionamentos resultantes do aumento da frota de veículos automobilísticos no período de 1940-1950, os avanços no desenvolvimento dos computadores e a mudança de abordagem nas Ciências Sociais com a “Revolução Quantitativa” proporcionaram condições para o desenvolvimento destes modelos (BATTY, 1976).

O desenvolvimento da primeira geração de modelos urbanos na década de 1960 foram influenciados por dois modelos teóricos da estrutura urbana finalizados no início da década, sendo o modelo de localização intraurbana de Wingo (1961) e o modelo econômico para sistema urbano proposto por Alonso (1960). Essa geração de modelos urbanos teve origem na América do Norte e foram projetados e implementados em um momento de aumento dos estudos sobre transportes e uso da terra nas principais áreas metropolitanas do continente (ALMEIDA, 2003).

Durante a década de 1960 os modelos urbanos podiam ser agrupados em virtude das técnicas aplicadas, sendo estas a estatística linear, não-linear, programação matemática e gravitacional, esta última abordagem contribuindo com as pesquisas de maior destaque nessa década, como realizado nos trabalhos de Lowry (1964) (BATTY, 1976).

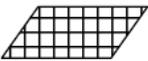
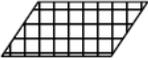
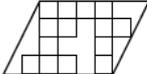
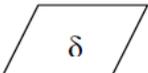
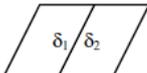
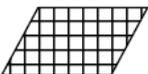
No período entre 1970-1986 surgiram novas abordagens para modelagem, com avanços nos estudos sobre o crescimento urbano, adotando para isso uma visão integradora desse fenômeno, uma vez que, considerava simultaneamente diferentes fatores (uso do solo, sistema de transportes, loteamentos habitacionais, densidade populacional, entre outros) com influência sobre o crescimento urbano, e assim, ratificou-se uma evolução em relação as abordagens precedentes (ALMEIDA, 2003).

No entanto, mesmo diante das conquistas alcançadas com essa abordagem integralizada, a representação espacial nestes estudos ainda era embrionária e apenas no final dos anos 80 com o desenvolvimento de técnicas como os autômatos celulares e mudanças nas concepções sobre modelagem houve um significativo desenvolvimento nos modelos espaciais dinâmicos (ALMEIDA; MONTEIRO; CÂMARA, 2003).

Para modelagem de processos dinâmicos em SIG com resultados mais próximos da realidade, as concepções pré-estabelecidas dos modelos precisava ser flexibilizada para que o sistema consiga representar os fenômenos de forma dinâmica. Diante disso, como demonstra a Figura 1 na coluna à esquerda são apresentados a flexibilização necessária para cada um dos requisitos contidos nos modelos espaciais.

Ainda sobre a Figura 1, com essa nova abordagem o espaço cartesiano é entendido como uma grade em que a estrutura pode ser irregular e as suas propriedades não-uniforme, admite-se a possibilidade da irregularidade temporal. As funções de transição são analisadas de maneiras não universal, uma vez que, cada uso do solo possui características e relações distintas. A vizinhança pode ser não estacionária e o sistema com características abertas com fluxos dinâmicos.

**Figura 1** – Requisitos para modelagem dinâmica.

Espaço	Estrutura	Regular 	irregular 
	Propriedades	Uniforme 	não uniforme 
Vizinhança		Estacionária 	não estacionária 
Função de Transição		Universal 	não universal 
Tempo		Regularidade 	irregularidade 
Sistema		Fechado 	aberto 

Fonte: Coucluesis (1997 apud PEDROSA e CÂMARA,2003).

Novaes (1981) apud Almeida (2003) detalha no Quadro 1 as tipologias de modelos existentes juntamente com os objetivos alcançados por cada um destes. Neste sentido, as dinâmicas do espaço urbano, possuem funções que podem ser relacionadas com os modelos preditivo e operacional, uma vez que, estes têm como objetivo explorar a variável temporal para avaliar a organização espacial presente que são reflexos das estratégias empregadas no

processo de expansão urbana, e por outro lado compreender a influência de fatores externos sobre o sistema urbano (ALMEIDA, 2003).

**Quadro 1** – Classificação dos modelos de acordo com as tipologias.

Descritivo	Entender o funcionamento do sistema.
Explorativo	Análise paramétrica de diversos estados, com variação dos elementos e suas relações, sem atuação externa sobre estes.
Preditivo	Explorativo com a variável tempo, inclui a projeção de alguns elementos básicos.
Operacional	Atuação de fatores externos que podem modificar o funcionamento do sistema.

**Fonte:** ALMEIDA, 2003.

Os modelos de simulação espacial podem ser classificados em empíricos e de sistemas. Os modelos empíricos analisam os relacionamentos entre as variáveis, tendo como exemplo os modelos de cadeias de Markov, logístico de difusão e a regressão. Por outro lado, os modelos de sistemas, descrevem o sistema como um todo, buscando representar as interações entre as partes do sistema, como exemplo temos os modelos de simulação de ecossistema e o espacial dinâmico (ALMEIDA; MONTEIRO; CÂMARA, 2003).

Para Pedrosa e Câmara (2003) os modelos espaciais precisam responder três questões essenciais: Onde, Quando e Por quê. A partir destas respostas é possível descrever um fenômeno espacial de forma quantitativa e elaborar previsões da sua evolução integrando as escalas temporal e espacial. Na Tabela 1 estão detalhadas as respostas que podem ser obtidas para cada uma das perguntas a partir de diferentes modelos de simulação espacial, dessa forma é possível definir qual destes consegue atingir os objetivos do pesquisador.

Segundo Pedrosa e Câmara (2003) em relação ao processo de elaboração dos modelos empíricos são necessárias três componentes chaves, sendo: configuração inicial, função de mudança e configuração de saída. Estes modelos têm como características a utilização de modelos matemáticos simples e a utilização de poucas variáveis, mas possuem resultados satisfatórios na elaboração de cenários futuros, embora tenha limitações para analisar a evolução espacial e identificar as causas deste processo.

**Tabela 1** – Características chaves dos modelos de simulação espaciais.

<b>MODELO</b>	<b>PORQUÊ</b>	<b>QUANDO</b>	<b>ONDE</b>
<b>Cadeias de Markov</b>	Não explica a razão de um fenômeno por ser processo estocástico e não suportar a inclusão de variáveis exógenas.	Pode prever a evolução de processos estacionários.	Predizer distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com SIG.
<b>Logístico de Difusão</b>	Permite a inclusão de poucas variáveis exógenas, entretanto é um modelo descritivo, não suportando investigações exploratórias.	Suporta a dimensão temporal, podendo prever a evolução de processos não estacionários.	Predizer distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com SIG.
<b>Regressão</b>	Contribui para identificar forças direcionadoras, entretanto são modelos descritivos, falta estabelecer relações causais entre as variáveis.	Pode prever a evolução de processos estacionários.	Não são modelos espaciais, entretanto podem ser combinados com GIS.
<b>Simulação de Ecossistemas</b>	Modelo exploratório que requer descrições funcionais dos sistemas ecológicos.	Pode formular cenários de mudanças futuras no uso do solo, baseado nos parâmetros do modelo.	Apresenta dificuldades na representação espacial.
<b>Simulação Espacial Dinâmica</b>	Requer modelos funcionais espacialmente definidos.	Pode prever mudanças temporais no uso do solo, baseado nos parâmetros do modelo.	Predizer a evolução de padrões espaciais em processos determinísticos.

**Fonte:** PEDROSA e CÂMARA (2003).

Segundo Wegener et al. (1986) apud Almeida (2003) para que o modelo seja dinâmico, algumas características devem ser atendidas, sendo que, o mesmo deve demonstrar de maneira nítida a sua dimensão temporal, as alterações causadas pelo transcorrer do tempo nas entradas e saídas do modelo, e por fim, a dependência atual do estado dos modelos em relação aos estados pretéritos.

### **3.3 Classificação do uso e cobertura da terra e o método GEOBIA**

Os conceitos de uso e cobertura da terra são utilizados de forma alternativas e por vezes de maneira equivocada em relação aos objetivos dos estudos, sendo assim ressalta-se a importância da definição adequada destes termos. Neste sentido o IBGE (2013) afirma no Manual Técnico de Uso da Terra que o termo “uso da terra” define as atividades antrópicas, relacionado as atividades de exploração e transformação dos recursos naturais, ademais possuem funções socioeconômicas. Por outro lado, o termo “cobertura da terra” está

relacionado aos elementos naturais encontrados na superfície terrestre (vegetação, água, rochas, areias, entre outros), bem como as construções elaboradas pelo homem.

Nesta perspectiva, a classificação digital de imagens tornou-se uma das principais aplicações no processamento digital de imagens obtidas por sensoriamento remoto, gerando como principal produto os mapas temáticos que podem conter informações relacionadas as diversas possibilidades de uso e cobertura da terra (RIBEIRO; KUX, 2009).

O processo de classificação pode ser manual, necessitando de maior tempo na elaboração e padronização dos critérios e de uma acurácia visual do pesquisador, no entanto sofre críticas devido a subjetividade na definição dos critérios. Este processo pode também ser automático, mas a precisão dos resultados é questionada. Neste caso, os classificadores podem ser supervisionados ou não, e sua abordagem definida por pixel-a-pixel ou região definida por segmentação. Sobre os classificadores automáticos foi desenvolvida a abordagem orientada a objetos com intuito de aprimorar o processo de classificação utilizando a lógica *Fuzzy* (RIBEIRO; KUX, 2009).

A classificação com abordagem pixel-a-pixel analisa de forma individual os valores dos pixels das bandas espectrais selecionadas, esta classificação identifica a classe através da comparação dos dados de cada pixel com o padrão de cada classe. Dessa forma, a sua maior limitação reside na avaliação pontual ser baseada apenas nas características espectrais e dentro de áreas urbanas temos uma grande variabilidade espectral inter e intra-classes que dificultam a utilização desta técnica (RIBEIRO; KUX, 2009).

Ao analisar áreas urbanas com o método pixel-a-pixel nos deparamos com diversos objetos com resposta espectral similar devido principalmente a diversidade dos materiais construtivos utilizados, ademais, podemos encontrar em um mesmo pixel diferentes classes de uso do solo. Esses fatores dificultam a utilização de técnicas pixel-a-pixel, uma vez que, estas produzem o efeito “sal e pimenta” com superfícies descontínuas (RIBEIRO; KUX, 2009).

Os avanços obtidos com as imagens de satélite com melhora significativa desses produtos, tiveram como consequência o aumento da necessidade de métodos de classificação mais eficientes e precisos. No entanto, mesmo com maiores resoluções espaciais os problemas com os pixels mistos ainda permanecem, visto que, estes podem representar mais de um alvo de interesse, mas acabam sendo classificados para uma única categoria. Na tentativa de superar essa dificuldade desde a década de 1970 alguns métodos foram desenvolvidos como o modelo de mistura linear, lógica *fuzzy* e redes neurais (BLASCHKE et al., 2000).

Paralelamente ao desenvolvimento dos sensores ocorre o aprimoramento das técnicas de interpretação de imagens e análise dos dados permitindo a geração de informações sistematizadas e objetivas. A partir disso, surge a classificação orientada a objetos com resultados satisfatórios e eficientes, também conhecida como GEOBIA (*Geographic-Object-Based Image Analysis*). A técnica consiste em uma etapa de segmentação onde a imagem é dividida em objetos homogêneos e contínuos, sendo a classificação realizada a partir desses objetos (ALVES et al., 2009).

A GEOBIA tem apresentado resultados superiores no processamento digital de imagens obtidas por sensoriamento remoto, uma vez que esta técnica analisa parâmetros além dos dados espectrais, como a textura e forma dos objetos que compõem uma determinada imagem de satélite (WATTS et al., 2009). Esse método de classificação apresenta vantagens em relação aos outros métodos, pois possui uma estatística mais significativa, permite a utilização de outros atributos dos objetos, como o formato, a topologia e as relações entre os mesmos, diante disso, estas possibilidades permitem uma maior acurácia na classificação (BENZ et al., 2004).

O método GEOBIA está apoiado no agrupamento de pixels a partir da segmentação multiresolução da imagem em objetos contíguos e homogêneos, existe inúmeras variáveis que podem ser calculadas como pertencendo a um sub ou super objeto, dentro de uma hierarquia de multiníveis. Neste processo são empregados por meio da lógica *fuzzy* o grau de pertinência dos objetos à determinada classe (CHUBEY; FRANKLIN; WULDER, 2006).

### **3.4 Segmentação de imagem e o classificador “*Nearest Neighbor* (NN) ”**

Para Baatz e Schape (2000) ao analisar imagens de satélite precisamos compreender a semântica destas, e muitas vezes, isso contribui para o levantamento de informações relevantes que não são encontradas analisando o pixel individualmente, e sim em objetos homogêneos e com relações entre si. Além disso, existem informações contidas na textura das imagens que contribuem para o sucesso na análise, desta forma torna-se necessário a segmentação em áreas de pixels com significativa homogeneidade da superfície.

O processo de segmentação frequentemente é ajustado através do método “*trial and error*” em que o usuário precisa definir três parâmetros, sendo este a escala, forma e compacidade. O parâmetro de escala define qual a heterogeneidade máxima permitida nos objetos, o seu valor varia de acordo com o tamanho dos segmentos, dessa forma, quanto maior este valor, maiores serão os objetos. A compacidade expressa o limite entre objetos,

sendo assim, quanto maior a fragmentação, maior o índice de forma. Por fim, o parâmetro da forma consiste na união dos parâmetros de compacidade e suavidade, onde a compacidade é determinada pela razão da área do objeto e o raio da circunferência abrangente (EVANS et al., 2010).

Baatz e Schape (2000) descrevem o processo de segmentação multiresolução como uma técnica de fusão de região, em que se inicia com o pixel formando um objeto na imagem e em cada etapa um par de objetos é fusionado formando um objeto maior. Para a definição dessa fusão são adotados critérios de homogeneidade, e este processo para a partir do momento que não é possível realizar mais fusões. A definição de tamanho dos objetos resultantes é determinada pelo parâmetro de escala. Diante disso, os autores afirmam que o processo de segmentação multiresolução possui duas características principais, sendo a heurística de decisão para definir os objetos que serão mesclados em cada etapa e a definição da homogeneidade dos objetos para calcular o grau de ajuste de um par de objetos da imagem.

Para realizar a classificação é possível utilizar diferentes tipos de algoritmos classificadores, estes podem ser agrupados em individuais como os classificadores estatísticos (K-médias, máxima verossimilhança, distância mínima, paralelepípedo, entre outros); classificador por rede neural artificial; classificador por aprendizagem de máquina; classificador *fuzzy*; ou ainda uma combinação entre diversos classificadores a partir de mecanismos específicos (LIU et al., 2006).

Neste sentido, baseado na lógica *fuzzy*, o classificador *Nearest Neighbor* (NN) utiliza um conjunto de amostras de diferentes classes atribuindo valores de associação entre 0 e 1 a partir da distância de espaço do objeto da imagem para seu vizinho mais próximo. Este procedimento consiste em duas etapas distintas, sendo que na 1ª para o treinamento do sistema são selecionados objetos associadas as classes temáticas utilizadas, estes definidos como amostras, e na 2ª etapa os objetos são classificados na imagem com base nas amostras vizinhas mais próximas (DELFINS, 2012).

### **3.5 Validação estatística – Exatidão global e índice Kappa**

Nas pesquisas que utilizam mapeamento baseados em imagens de satélites é necessário a aplicação de técnicas estatísticas para validação destes produtos. Neste sentido, a etapa de validação da precisão pode ser definida como a comparação entre duas fontes de dados, sendo uma baseada na análise dos dados da classificação e outra baseada nos dados das

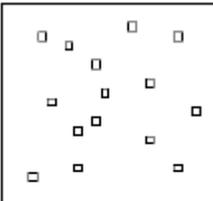
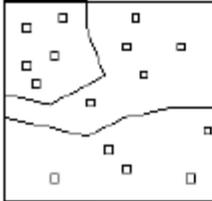
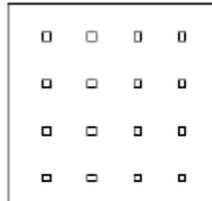
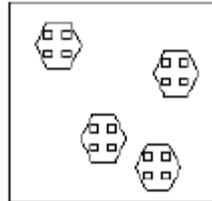
amostras de referência, que possuem precisão e são adquiridos em diferentes fontes de informações (CAMPBELL; WYNNE, 2011).

Costa e Brites (2004) ressaltam que alguns fatores podem influenciar na exatidão do mapeamento de uso e cobertura da terra, dentre estes, destaca o sombreamento provocado pelo relevo que gera respostas espectrais diferentes para feições iguais, a superposição da reflectância de alvos diferentes para a mesma faixa espectral, a pouca representatividade das amostras de treinamento e ainda a própria capacidade do usuário em resolver as inconstâncias durante o processo.

Em relação a coleta de amostras de referência encontramos na literatura diferentes estratégias (aleatória estratificada, casualizada, sistematizada, sistemática estratificada) para geração destes dados, e devemos ressaltar a importância na definição da estratégia de amostragem aplicada para ratificar a fidedignidade e confiabilidade da classificação realizada (BRITES, 1996; CAMPBELL; WYNNE, 2011).

A definição da técnica de amostragem deve considerar diversos fatores como o tamanho da área de estudo, tipologia, representatividade e características dos objetos que serão mapeados, e por fim, o custo de aquisição dos dados de validação. No Quadro 2 são apresentadas algumas das principais estratégias de amostragem, com as principais vantagens e desvantagens na aplicação de cada uma destas segundo Banko (1998).

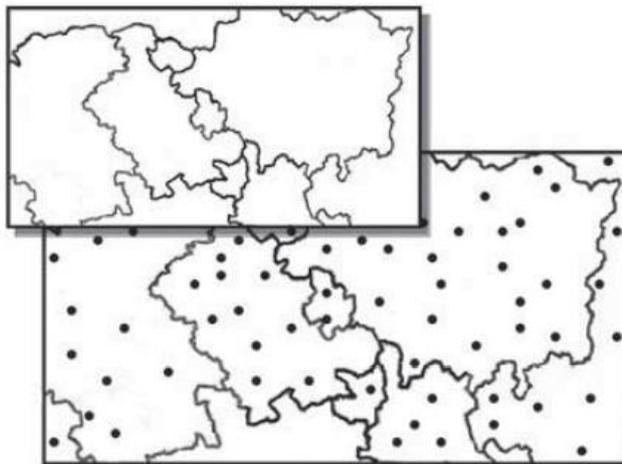
**Quadro 2** – Estratégias de coleta de amostras para validação.

<b>Estratégia</b>	<b>Aleatória</b>	<b>Aleatória Estratificada</b>	<b>Sistemática</b>	<b>Cluster</b>
<b>Exemplo da amostragem</b>				
<b>Principal Vantagem</b>	Eficiência estatística	Representativo para todas as áreas	Distribuição uniforme	Custo benefício
<b>Principal Desvantagem</b>	Eficaz apenas em áreas pequenas	Conhecimento da área <i>a priori</i>	Autocorrelação espacial	Dependência espacial

Fonte: BANKO (1998).

Campbell e Wynne (2011) corroboram ao destacar a utilização da amostragem aleatória estratificada, em que, cada categoria ou classe é definida neste caso, como um estrato. A partir disso, são inseridos pontos de amostragem de forma aleatória em cada um dos estratos, sendo que a quantidade de pontos possui relação com o tamanho e significância de cada categoria (FIGURA 2). A aleatoriedade na localização destes pontos dentro de cada categoria garante uma amostra representativa para cada classe.

**Figura 2** – Aplicação da amostragem aleatória estratificada.



**Fonte:** Campbell; Wynne (2011).

Para a definição da quantidade de pontos na amostragem Congalton (1991) recomenda a coleta de pelo menos 50 amostras por categoria, entretanto, caso a área tenha tamanho superior a 4046 km<sup>2</sup> ou quantidade de categorias superior a 12, a quantidade de amostras deve ser entre 75 a 100 por categoria. O autor ainda ressalta que a quantidade de amostras pode ser ajustada com base na importância relativa de cada categoria para o objetivo da pesquisa.

Uma das maneiras mais comuns para avaliar a precisão da classificação é a elaboração de uma matriz de erro, também denominada como matriz de confusão ou matriz de contingência. Nesta matriz é possível identificar o erro geral para cada categoria, os erros resultantes da confusão entre as categorias e também na diagonal principal podemos identificar os pixels com classificação correta (BANKO, 1998). A partir dessa matriz, pode ser derivado medidas e índices estatísticos, sendo os mais comuns na literatura, a exatidão global e o índice *Kappa* (CONGALTON, 1988).

A exatidão global ou acurácia global é uma estatística descritiva simples, sendo calculada através da divisão entre a soma da diagonal principal *xii* da matriz de erro, que

representa os pixels classificados corretamente, pelo número total de pixels da matriz de erro  $n$  (CONGALTON, 1991), representada na Equação 1.

Equação 1

$$G = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii}}{n}$$

O coeficiente *Kappa* de concordância foi elaborada por Cohen (1960), no início da década de 1980 passou a ser utilizado no sensoriamento remoto e rapidamente se tornou uma técnica amplamente empregada para calcular a precisão de classificação. Definida como uma técnica multivariada discreta aplicada para avaliação de precisão temática, conquistou popularidade por considerar todos os elementos da matriz de confusão, e não apenas a diagonal principal como outras técnicas (FOODY, 1992). Sendo definido pela seguinte equação:

Equação 2:

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}$$

No qual:

$K$  = Estimativa do coeficiente *Kappa*;

$x_{ii}$  = Valor da linha  $i$  e coluna  $i$ ;

$x_{i+}$  = Soma da linha  $i$  da matriz de confusão;

$x_{+i}$  = Soma da coluna  $i$  da matriz de confusão;

$n$  = Número total de amostras;

$c$  = Número total de classes;

Na tentativa de facilitar a interpretação da equação do coeficiente *Kappa*, Chrisman (1980) apud Campbell e Wynne (2011) elaborou uma versão mais simplificada, dada pela equação:

Equação 3

$$\hat{K} = \frac{(\text{observado} - \text{esperado})}{(1 - \text{esperado})}$$

Nesta definição, entende-se por **observado** a medida de precisão geral, resultante da soma dos elementos da diagonal principal na matriz de confusão dividido pelo total de

amostras, sendo que os valores na diagonal representam em cada categoria a quantidade de pixels classificados corretamente. O valor do **esperado** é indicado pelo produto do total de cada linha e coluna da matriz, representando a quantidade de pixels para cada célula da matriz, uma vez que, estes são atribuídos por chance em cada classe (CAMPBELL; WYNNE, 2011).

Conforme ilustrado no Quadro 3 para avaliar o índice *Kappa* diversos estudos utilizam a escala de concordância elaborada por Landis e Koch (1977), onde valores menores que 0.00 tem avaliação de concordância péssima e no outro extremo os valores na faixa de 0,81 a 1,00 são avaliados como excelente, no quadro podemos visualizar a escala de forma detalhada. Neste sentido, os trabalhos que possuem valores acima de 0,80 são considerados como muito próximos da realidade, e ainda permitem a utilização destes em modelagem de cenários preditivos.

**Quadro 3** – Escala de avaliação do índice *Kappa*.

<b>Índice <i>Kappa</i></b>	<b>Avaliação de Concordância</b>
<0.00	Péssima (Pobre)
0.00-0.20	Ruim (Pouco)
0.21-0.40	Razoável (Justo)
0.41-0.60	Bom (Moderado)
0.61-0.80	Muito Bom (Substancial)
0.81-1.00	Excelente (Quase Perfeito)

**Fonte:** Landis e Koch, 1977.

### 3.6 Modelagem Preditiva – Cadeias de Markov e Autômatos Celulares

Os algoritmos da cadeia de *Markov* foram elaborados pelo matemático russo *Andrei Andreyevich Markov* (1865 – 1922), como um modelo matemático de processo estocástico, que possibilita descrever processos aleatórios de mudanças de estado em um determinado intervalo de tempo, representado pela seguinte fórmula:

Equação 4

$$\Pi_{(t+1)} = P_n \cdot \Pi_{(t)}$$

Onde:  $\Pi_{(t)}$  é o estado do sistema no tempo  $t$  (presente);

$\Pi_{(t+1)}$  é o estado do sistema após o instante  $t+1$  (futuro);

$P_n$  são os estados passíveis

A cadeia de Markov quando aplicada em análises de uso e cobertura da terra, apresenta o resultado como uma matriz de probabilidade de transição, que expressa a possibilidade de mudança entre as classes após um determinado intervalo de tempo, sendo que, possuem precisão sobre o tipo de classe, no entanto não existe conhecimento sobre a distribuição espacial destas ocorrências (EASTMAN, 2003).

Pedrosa e Câmara (2003) afirmam que as cadeias de Markov ao projetar o futuro do sistema consideram apenas seu estado atual e as possibilidades de transição, independente do histórico de trajetória até o presente, entretanto, não desconsidera os eventos do passado, mas admite que as informações do passado estão contidas no estado presente do sistema. Por fim, destacam a característica estacionária do modelo, visto que, as probabilidades de transição não sofrem alteração com o transcorrer do tempo.

Dentre as vantagens da aplicação das cadeias de Markov estão a facilidade operacional, simplicidade matemática, aplicação satisfatória em dados gerados por sensoriamento remoto, facilidade na implementação em ambiente SIG, e ressalta-se a utilização de poucos dados de entrada para gerar uma previsão futura (PEDROSA; CÂMARA, 2003).

Por outro lado, Ribocom e Caneparo (2017) afirmam que este modelo é deficitário quando aplicado sozinho, visto que, não considerada a influência do tempo sobre as mudanças no espaço e dessa forma as probabilidades de transição se mantêm inalteradas com o avanço temporal. Neste sentido, as críticas sobre a aplicação das cadeias de Markov estão relacionadas a limitação da resposta espacial onde os fenômenos ocorrem, na ausência da explicação sobre as causas do fenômeno e na capacidade de realizar previsão apenas quando os processos são estacionários (PEDROSA e CÂMARA, 2003).

No entanto, essas críticas são superadas com a utilização em conjunto de outra técnica, por exemplo, com a aplicação de um filtro de Autômato Celular em que são imputadas variáveis explicativas das mudanças no uso e cobertura da terra, e dessa forma são gerados resultados espacialmente mais próximos da realidade (SANTOS, 2014).

Os Autômatos Celulares (AC) foram criados por *John von Neumann* nos anos de 1950, com o intuito de modelar processos de crescimento e reprodução de organismos biológicos. No entanto, começou a ser aplicado nos estudos geográficos apenas no período da Geografia Quantitativa, sobretudo, em virtude dos trabalhos de Waldo Tobler que na década de 1970 aplicou modelos de autômatos celulares para analisar o desenvolvimento da cidade de Detroit.

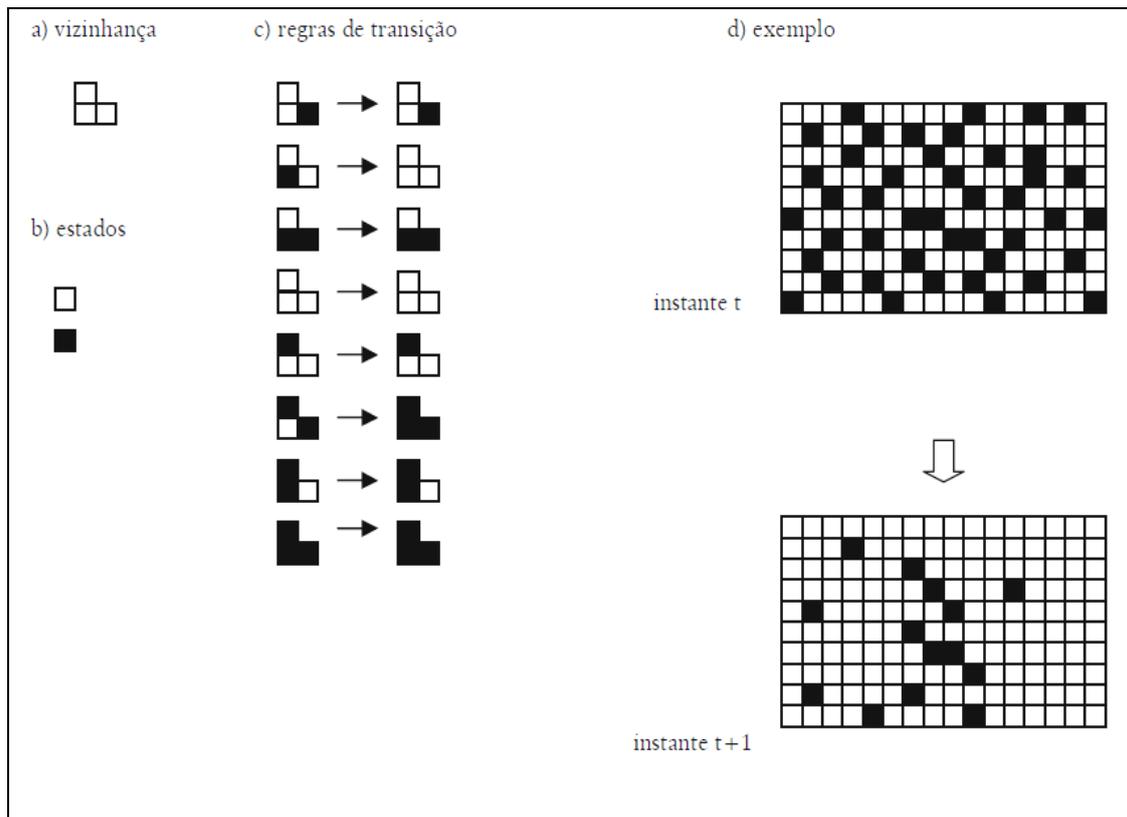
Entretanto foi na década de 1980, com estudo de Los Angeles sobre o comportamento de empreendimentos imobiliários desenvolvido por Couclelis (1989) influenciado por Tobler que ocorreu a consolidação destes modelos com aprimoramentos conceituais (ALMEIDA et al., 2003).

Posteriormente, os AC foram aplicados para diversas finalidades de análise do espaço geográfico como para modelagem do desenvolvimento urbano, simulação do uso da terra e modelagem das mudanças de uso e cobertura da terra. As vantagens de utilizar os AC em modelos preditivos seriam as interações descentralizadas e individuais em cada pixel ou célula, visto que, o estado futuro de determinada célula depende do estado prévio das células da vizinhança complementado com a aplicação de certas regras de transição (TORRENS, 2003).

Os autômatos celulares funcionam em função das relações de vizinhança imediata, desta forma, não existem ações a distância entre as células na produção de fenômenos emergentes a nível global. Desta forma, tais modelos tinham como premissa de mudanças nas ações locais, e não consideravam na análise intervenções que ocorriam além da vizinhança local (BATTY, 2000).

Na abordagem com AC o espaço é representado em formato de grade geralmente com tamanhos e formatos idênticos. A partir disso, em cada célula desta grade são aplicadas as regras de transição, qualitativas ou quantitativas, estas que determinam quando e o porquê o estado de cada célula sofre alteração. Para a aplicação deste mecanismo são necessários alguns elementos básicos (FIGURA 3), como: o espaço euclidiano, tamanho e formato da vizinhança, conjunto de estados possíveis, regras de transição, intervalo de tempo com a atualização das células (PEDROSA e CÂMARA, 2003).

**Figura 3** – Componentes para aplicação do autômato celular.



**Fonte:** Pedrosa e Câmara (2003).

Almeida (2003) destaca que os AC são modelos flexíveis e dinâmicos, que possuem simplicidade operacional e apresentam complexidade suficiente para simular mudanças futuras inesperadas para fenômenos emergentes. E devido ao fato de representar o espaço em formato de grelha, podem, portanto, serem aplicados em dados matriciais gerados por sensoriamento remoto que são frequentemente utilizados em softwares de SIG.

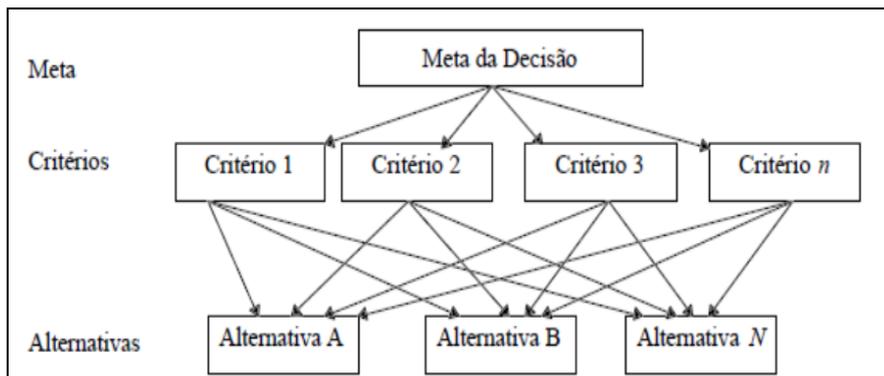
Em relação aos modelos celulares voltados para simulação de mudanças de uso no solo urbano, existem diferentes variações sobre o ajuste entre os algoritmos de simulação e os dados de entrada. Destacam-se três abordagens, sendo que no primeiro modelo os parâmetros para a modelagem são determinados por equações determinísticas definidas para cada estudo. A segunda abordagem utiliza procedimentos heurísticos para parametrizar o modelo, através de análises comparativas de resultados prévios da simulação. A última abordagem é totalmente voltada para os dados disponíveis em cada estudo e o ajuste dos padrões utiliza de procedimentos como redes neurais, aprendizado evolucionário ou algoritmos genéticos (ALMEIDA; MONTEIRO; CÂMARA, 2003).

#### 4.7 AHP – Processo Analítico Hierárquico (*Analysis Hierarchy Process*)

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) foi elaborado por Thomas L. Saaty na década de 1970 onde a partir das variáveis analisadas é elaborado uma escala de importância entre estas, posteriormente, utilizando uma matriz de relacionamento é realizada uma comparação entre pares para estabelecer uma hierarquia de importância entre as variáveis (BERGER et al., 2007).

Segundo o *Decision Support Systems Glossary* (DSS, 2006) o método AHP pode ser definido como uma abordagem para tomada de decisão que estabelece uma hierarquia sobre critérios de múltipla escolha de acordo com a importância relativa de cada um destes. Diante disso, é realizada uma comparação dos pares de critério que produz uma classificação hierarquizada das alternativas para resolução dos problemas.

**Figura 4** – Estrutura hierárquica de problemas de decisão.



Fonte: Saaty (1991).

Conforme Saaty (1991) para a tomada de decisão sobre determinado problema, primeiro, é necessário que o mesmo seja decomposto em partes, representando estas por níveis hierárquicos, pois isto facilita a compreensão e visualização da estrutura através de um modelo formal. O topo da hierarquia representa a síntese final ou a meta de decisão, enquanto nos níveis inferiores são inseridos os critérios com alguma influência sobre a meta de decisão. No último nível da hierarquia, são definidas as alternativas consideradas para a solução dos critérios (FIGURA 4).

Para definir os pesos adotados na comparação entre os pares é necessário compreender os julgamentos criados por Saaty na elaboração do método, tendo em vista que a comparação se trata de uma representação numérica da relação entre os pares. Saaty (2008) apresenta a definição e explicação para os valores da escala numérica, conforme exposto na Tabela 2 com variação entre 1 a 9, em que o valor 1 representa a indiferença de importância de um critério em relação a outro, e o valor 9 significa extrema importância de um critério sobre outro.

**Tabela 2** – Escala numérica de Saaty.

<b>Intensidade de importância</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Importância igual	Os dois elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem levemente um critério em relação ao outro
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um critério em relação ao outro
7	Importância muito forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Extrema importância.	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes.	Quando se procura uma condição de intermediária entre as definições principais.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i.	Uma designação razoável.
1.1-1.9	Variáveis estão muito próximas	Quando existe dificuldade em atribuir o melhor valor as variáveis, onde os valores menores não serão tão perceptíveis, indicam uma importância relativa às variáveis.

**Fonte:** Adaptado de Saaty (2008).

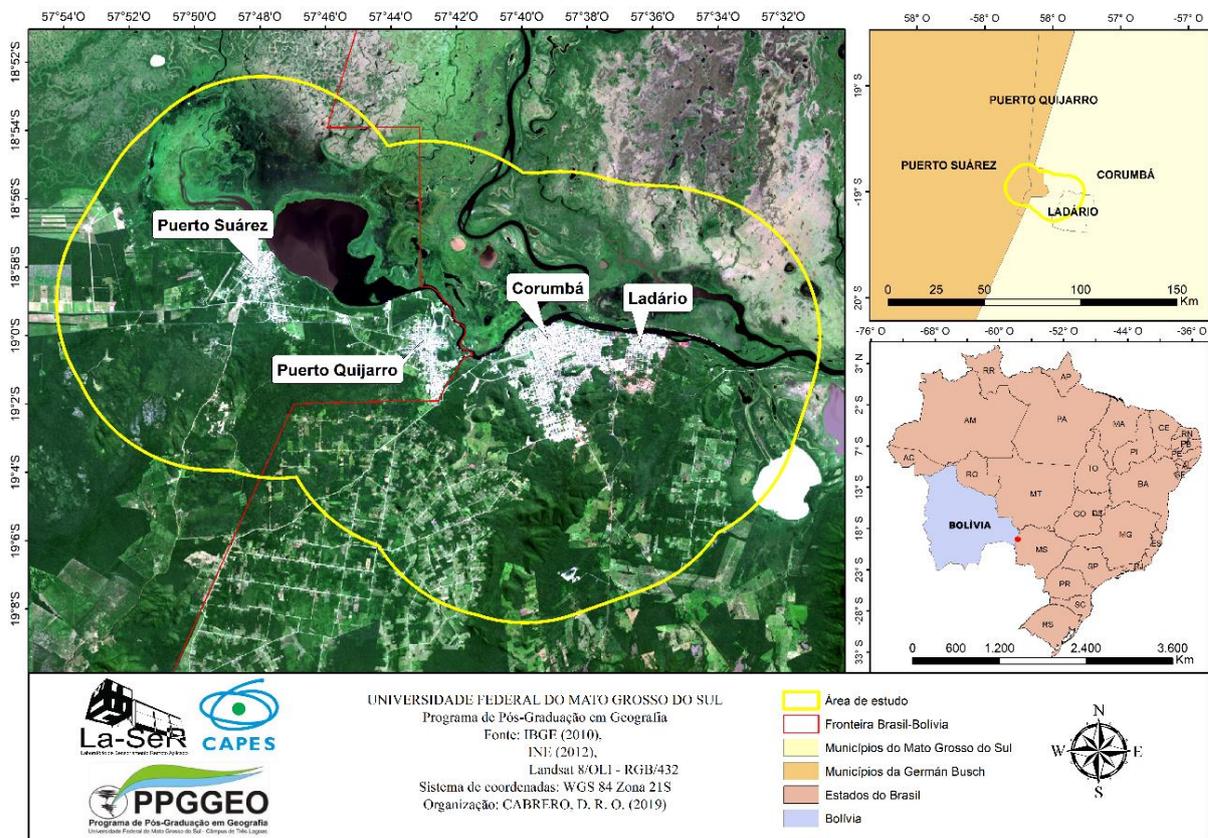
A aplicação da AHP permite a análise das relações entre diferentes variáveis ambientais e socioeconômicas que influenciam na produção do espaço geográfico criando em algumas situações áreas com vulnerabilidade socioambiental. Dessa forma durante esta análise são determinados pesos para as variáveis, estes são determinados pela influência de cada variável sobre o processo de produção dos fenômenos estudados (MANTOVANI, 2016).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Caracterização da área de estudo

A localização da área de estudo deste trabalho possui uma divisão político-administrativa definida pela presença da fronteira internacional Brasil-Bolívia e da separação em dois blocos com nacionalidades distintas. Dessa forma, no lado brasileiro estão situados os municípios de Corumbá e Ladário, na microrregião do Baixo Pantanal, enquanto no território boliviano encontram-se as seções municipais de Puerto Suárez e Puerto Quijarro, na província de Germán Busch.

**Figura 5** – Localização da área de estudo.



Para a definição desta área de estudo admitiu *a priori* que a expansão da malha urbana de todas as cidades até o ano de 2060 não irá ultrapassar o limite de 8 km, considerando a distância euclidiana a partir do ponto da sede urbana para as cidades de Corumbá e Ladário, e a partir do ponto no centro das cidades de Puerto Suarez e Puerto Quijarro, posto isso, conforme demonstrado na Figura 5 foi delimitada uma área com 813 km<sup>2</sup> de extensão na região fronteiriça, situada entre os paralelos 18° 52' 30'' S e 19° 8' 30'' S e os meridianos 57° 30' 30'' O e 57° 54' 30'' O.

#### 4.1.1 Histórico de ocupação da região fronteiriça e dinâmicas populacionais

Entre os séculos XVI e XVIII, após a descoberta de ouro em Coxipó (atual Cuiabá), a região sul do Pantanal de Mato Grosso se transformou em uma das principais rotas para o abastecimento das zonas mineradoras e o escoamento dos metais preciosos e outros produtos da colônia, esta dinâmica contribuiu para que os portugueses avançassem sobre o limite imposto no Tratado de Tordesilhas, estabelecendo pontos de ocupação e novas rotas (COSTA, 1999 *apud* MANETTA, 2009). No decorrer do século XVIII com o crescimento das atividades mineradoras, comerciais e pecuárias, ocorreu o fortalecimento do comércio interno entre os portos localizados ao longo dessas rotas, contribuindo para o escoamento dos produtos e reduzindo a dependência do abastecimento por produtos da metrópole europeia.

Devida a localização na fronteira com a Bolívia, essa região sempre teve importância estratégica na defesa dos limites do Brasil, e a ocupação desse território sempre teve importância para os interesses nacionais, por outro lado a fixação de pessoas nessa região aconteceu antes das definições das fronteiras em 1903 pelo tratado de Petrópolis, uma vez que, a formação de um núcleo urbano aconteceu por volta de 1778 com a criação da vila Corumbá (KUKIEL; COSTA; BENEDETTI, 2015).

No entanto, a ocupação esparsa e isolada nesta região, aliada a insuficiência militar colaborou para que, durante o período da Guerra do Paraguai (1864-1870) as invasões paraguaias no sul do Mato Grosso provocassem uma desarticulação do comércio existente via rio Paraguai, desestruturando as cidades existentes e suas atividades urbanas. Segundo Manetta (2009) somente após a expulsão dos paraguaios houve uma nova fase, impulsionada pelo capital estrangeiro e o comércio fluvial, com a ocupação das terras indígenas.

Durante a Guerra do Paraguai ficou evidente a deficiência de transporte para a região, a partir disso começaram estudos para a implementação de uma ferrovia. Após essa constatação, em 1905 foi iniciada a construção da Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, que tinha início em Bauru e destino final em Cuiabá, no entanto, após algumas dificuldades na execução da obra o traçado original foi alterado com o destino final para Corumbá, onde a ferrovia chegaria apenas no ano de 1952 (MARQUES, 2012).

A implantação da ferrovia transformou as dinâmicas econômicas da região, visto que, diversas cidades foram construídas ao longo do trajeto, os fluxos econômicos e de transportes que aconteciam entre as grandes cidades da bacia do Prata e a cidade de Corumbá perderam

importância frente ao aumento da articulação com o sudeste brasileiro, principalmente com São Paulo (CONTE, 2017; MARQUES, 2012).

Após a conclusão da ferrovia ocorrem alterações nos fluxos comerciais para Corumbá, visto que, a redução do trajeto até São Paulo contribuiu para o aumento da articulação entre os estados e colaborou para o crescimento de Campo Grande como principal entreposto comercial no sul do Mato Grosso com destaque para o comércio bovino. Devido essa nova articulação, as fazendas do Pantanal estreitaram seus vínculos com os frigoríficos paulistas, intensificando transações regulares de boi gordo utilizando a ferrovia (MANETTA, 2009).

A situação de declínio em Corumbá começou a sofrer alteração em 1954 em função da conclusão da ligação ferroviária entre Corumbá e Santa Cruz de la Sierra e a instalação de novas indústrias como a Sobramil que iniciou atividades de mineração de ferro em Urucum criando a necessidade de grande quantidade de mão-de-obra. Estes fatos contribuíram para a retomada do comércio fluvial, das exportações para o mercado boliviano e o surgimento de novas indústrias no porto local (OLIVEIRA, 2005; MANETTA, 2009).

Durante a década de 1980 ocorreram transformações na esfera político-administrativa em ambos os lados da fronteira, sendo que no território brasileiro em 1984 ocorre a emancipação do antigo distrito corumbaense de Ladário. Neste ano no território boliviano, o governo na tentativa de impulsionar o desenvolvimento da região do extremo oriente boliviano cria a província de Gérman Busch, dividida em duas sessões municipais, sendo Puerto Suárez, a capital da província e Puerto Quijarro, última cidade da fronteira com o Brasil (MANETTA, 2009).

Devido a sua localização geográfica a cidade de Corumbá adquiriu importância logística para o fluxo de mercadorias entre Brasil e Bolívia, uma vez que possui conexões com diversos modais de transportes (hidrovia, rodovia e ferrovia), e com a criação de instituições (Receita Federal, AGESA, Porto seco) para estimular e facilitar a circulação de mercadorias entre os dois países. Neste sentido, no território de Corumbá se estabeleceram atividades comerciais que consolidaram sua importância nas exportações de produtos para a Bolívia e o importações para o Brasil.

Os portos localizados em Corumbá contribuem para a distribuição da soja produzida no estado do Mato Grosso, e que é beneficiada em indústrias localizadas no percurso da hidrovia, como a Gravetal localizada em Puerto Suarez, destaque-se também as ligações ferroviárias, rodoviárias com o centro-sul do Brasil e o importante gasoduto Brasil-Bolívia

que tem sua entrada no Brasil pelo município de Corumbá (SILVA; MACHADO; RIBEIRO, 2009).

A exploração e o beneficiamento de minério ainda consistem na principal atividade industrial na região com a exploração da reserva de ferro El Mutun em Porto Suarez e as reservas de calcário e manganês de Urucum em Corumbá, sendo esta última cotada entre as maiores reservas do mundo, mas ainda operando abaixo do potencial devido a problemas de infraestrutura (MANETTA, 2009). O minério de ferro é o maior produto de exportação sendo escoado pela hidrovía Paraná-Paraguai, esta que estabelece conexão com a região da bacia do Prata onde o mineral é beneficiado e exportado para outros países (SILVA; MACHADO; RIBEIRO, 2009).

O comércio varejista de produtos importados possui grande importância econômica na região da fronteira, visto que, movimentam fluxos de pessoas nas feiras populares e na zona franca de comércio gerando também postos de trabalho para população (FIGURA 6). Em 2009 estudos demonstraram que esse comércio traz benefícios para o turismo que utiliza os preços competitivos dos produtos como atrativo para o turismo de compras na Bolívia, além disso também é explorado o turismo de pesca e contemplação, que atrai a maior quantidade de turistas, entretanto, nos últimos anos vem enfrentando declínio devido ao aumento do rigor das legislações ambientais de proteção (MANETTA, 2009).

**Figura 6** – Galerias de comércio varejista de roupas em Puerto Quijarro.



**Foto:** CABRERO, D. R. O. Trabalho de campo – julho/2019.

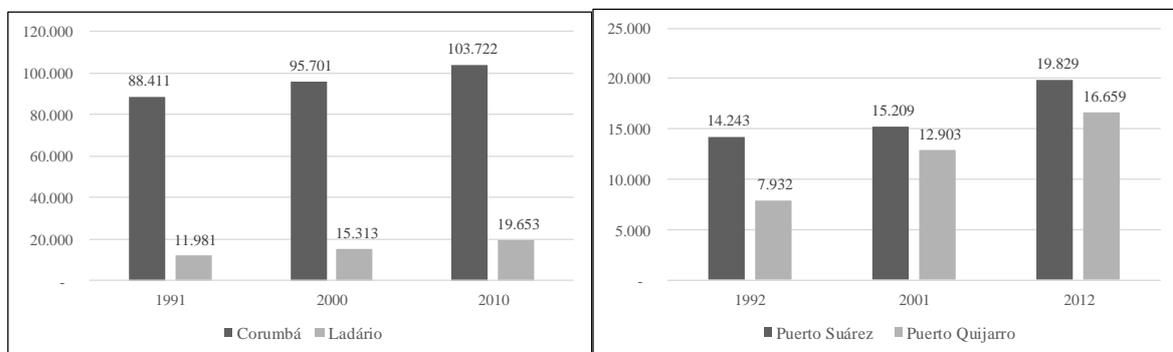
Segundo Oliveira e Esselin (2015) o desenvolvimento das atividades econômicas ligadas no princípio ao comércio portuário e à pecuária extensiva no Pantanal e posteriormente com a extração mineral foram fatores que estimularam o aumento populacional e a expansão da malha urbana. Dessa forma, as mudanças nos ciclos econômicos

e o processo de crescimento das cidades exerceram pressão para conversão no uso da terra, e assim transformando áreas agrícolas em urbanas e vegetação em novas áreas agrícolas.

Em relação as dinâmicas populacionais Manetta (2009) destaca que os processos migratórios e a mobilidade transnacional que ocorre na região fronteira de Corumbá, tiveram impactos no crescimento populacional e no crescimento da malha urbana das cidades. Entretanto, admite a necessidade de pesquisas para avaliar os impactos socioambientais decorrentes destas dinâmicas populacionais.

Manetta (2009) afirma que os municípios da região fronteira tiveram, no período entre 1991-2001, acentuado crescimento das cidades, apresentando taxas de crescimento superior a evolução da população total. Nesse sentido, na Figura 7 destaca-se Puerto Quijarro como cidade com o maior crescimento populacional nesse período relacionado com o fortalecimento do comércio informal urbano na região mais próxima da fronteira e a aliado a facilidade de mobilidade para Corumbá que permite acesso dos bolivianos a serviços públicos essenciais no Brasil, tem contribuído para a atração e retenção da população nas proximidades da fronteira.

**Figura 7** – População nos municípios da região fronteira de Corumbá.



Fonte: Adaptado de Manetta (2009).

## 4.2 Etapa inicial: aquisição de dados e delimitação da área de estudo

Para escolha das imagens de sensores orbitais optou-se pelos produtos da família *Landsat*, desenvolvidos pela NASA - *National Aeronautics and Space Administration*. Os produtos deste satélite possuem grande histórico temporal que contribuem para o objetivo deste trabalho e são dedicados a observação dos recursos naturais terrestres.

Neste trabalho foram adquiridas imagens de média resolução espacial disponíveis gratuitamente no USGS – *United State Geological Survey*, ademais justifica-se a escolha

dessas imagens pois segundo USGS (2017) as imagens disponíveis fazem parte de uma coleção nas quais foram realizados os processos de calibração radiométrica e ortoretificação com dados de pontos de controle e do modelo digital de elevação (DEM) que fazem parte da coleção de imagens L1TP (QUADRO 4).

**Quadro 4** – Descrição das características das coleções de imagens do USGS.

Landsat Level-1 Níveis de Processamento		
Pré-Coleção	Coleção 1	Descrição
L1T	L1TP	Calibração radiométrica e ortoretificada usando dados de pontos de controle e modelo digital de elevação (MDE) para corrigir o deslocamento do relevo. Estes são produtos de Nível 1 com alta qualidade, adequados para análises temporais em nível de pixel.
L1GT	L1GT	Calibração radiométrica e com aplicação de correções geométricas sistemáticas usando dados da passagem do satélite e dados MDE para corrigir o deslocamento do relevo.
L1G	L1GS	Calibração radiométrica e com aplicação de correções geométricas sistemáticas usando apenas dados da passagem do satélite.

Fonte: USGS (2017). Tradução do autor

A escolha das imagens (Tabela 3) Landsat do sensor TM (*Thematic Mapper*) e do OLI (*Operational Land Imager*) ambas com resolução espacial de 30m se justifica na escala destas cenas, pois conforme afirma Florenzano (2007) a escala de 1:100.000 permite a extração de maior quantidade de informações, por outro lado com escalas menores acontece uma compressão dos dados, e com escalas maiores uma degradação da imagem. Por outro lado, a escolha da imagem do Landsat 2 do sensor MSS (*Multispectral Scanner System*) foi definida para ampliar a análise temporal até a década de 1970 com produtos da mesma família de satélites.

**Tabela 3** – Relação das cenas da coleção Landsat utilizadas.

DATA DA IMAGEM	CENA	SENSOR	SATELITE	RESOLUÇÃO
27/05/1975	243-073	MSS	Landsat 2	80m
21/04/1985	227-073	TM	Landsat 5	30m
16/05/1994	227-073	TM	Landsat 5	30m
12/04/2005	227-073	TM	Landsat 5	30m
29/04/2017	227-073	OLI	Landsat 8	30m

Fonte: USGS (2018).

Para o processo de seleção das imagens foram priorizadas cenas disponíveis dos meses de abril e maio, sem falhas no imageamento e com cobertura de nuvens inferior a 10%. A escolha por cenas nos meses mencionadas se justifica, pois, durante as estações do outono e

inverno acontece uma redução da nebulosidade associada ao período de redução das chuvas, uma vez que, o período de chuvas tem início no mês de outubro (PARRA, 2001).

A delimitação da área de estudo foi elaborada dentro do software *ArcGIS 10.2* (ESRI, 2012), com o arquivo vetorial de pontos disponibilizado pelo IBGE (2010) que contém a sede dos municípios do Brasil e para os municípios de Puerto Quijarro e Puerto Suarez foram gerados pontos na região central destes usando como referência as imagens do *Google Maps*. Na sequência as camadas foram unificadas em um único arquivo vetorial, e na sequência utilizou-se a ferramenta *Buffer* para criar um raio de 8 km ao redor destes pontos definindo desta forma, os limites da área de estudo desta pesquisa.

### **4.3 Definição das classes temáticas**

Nesta etapa foram definidas as classes temáticas que foram utilizadas no processo de classificação da área de estudo. Após uma análise exploratória realizada com o auxílio das imagens de alta resolução disponíveis no *Google Earth* e utilizando como referência o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013) foram definidas 5 classes de uso e cobertura da terra, sendo elas Corpos hídricos, Agropecuária, Áreas construídas, Vegetação e Áreas úmidas. A definição das classes foi validada *in loco* após a realização de saída de campo com registros fotográficos das mesmas (QUADRO 5).

Na classe de Corpos hídricos reuniu-se os córregos, lagoas, rios e represas presentes na área de estudo, como também as áreas cobertas pela água devido as cheias do rio Paraguai. Na classe Agropecuária estão reunidas as áreas com presença de pastagem para a pecuária, as propriedades rurais com pequenas áreas de plantio para produção agrícola, ou ainda áreas com os dois usos de forma simultânea. As estradas rurais não pavimentadas também foram inseridas dentro desta classe.

A classe definida como Vegetação foram agrupadas áreas como diferentes tipologias vegetação florestal nativa, ou seja, que ainda não foram substituídas por outros usos, devido ao objetivo deste trabalho optou-se por não classificar as diferentes fisionomias de vegetação presentes na área de estudo, ademais, também foram inseridas nesta classe as áreas com regeneração da vegetação.

**Quadro 5** – Representação das classes temáticas.

<b>Classe temática</b>	<b>Descrição</b>	<b>Representação fotográfica</b>
<b>CORPOS HÍDRICOS</b>	Rios, córregos, lagoas, represas, áreas ocupadas por água	
<b>AGROPECUÁRIA</b>	Pastagem para pecuária, agricultura e estradas rurais	
<b>VEGETAÇÃO</b>	Vegetação florestal nativa e/ou de regeneração sem distinção das fisionomias	
<b>ÁREA ÚMIDA</b>	Planícies inundáveis em uma interface entre vegetação, solo e água.	
<b>ÁREA CONSTRUÍDA</b>	Áreas urbanas, rodovias pavimentadas, áreas de mineração.	

**Foto:** CABRERO, D. R. O. Trabalho de campo – julho/2019.

Na classe denominada como Áreas Úmidas foram agrupadas todas as áreas que possuem planícies inundáveis com predomínio de vegetação rasteira, onde são encontrados na interface entre solo, vegetação e água, principalmente no período de cheias do rio Paraguai,

nestes locais são formados ecossistemas complexos e com grande importância para o ciclo hidrológico, pois ampliam a capacidade de retenção de água na região.

Por fim, a classe de Área Construída compreende o sistema viário pavimentado, as áreas de exploração de atividade mineral no morro do Urucum e as áreas correspondentes as cidades, vilas e áreas urbanas isoladas estruturadas por edificações, segundo IBGE (2013) estes locais tem predomínio de superfícies artificiais não agrícolas.

#### **4.4 Pré-processamento das Imagens: 1975, 1985, 1994, 2005, 2017**

Nesta etapa as imagens foram importadas individualmente no *software* ENVI 5.3 (EXELIS, 2014) no formato MTL, o pré-processamento foi realizado com a correção radiométrica das imagens de todos os anos escolhidos com o uso da ferramenta *Radiometric Calibration* e aplicando as configurações FLAASH para este processo, assim as imagens foram convertidas para radiância.

Na sequência, demos início a etapa de correção atmosférica acessando o modulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*) que pode ser aplicado a diversos sensores e utiliza os algoritmos de transferência radiativa MODTRAN® (*Moderate Resolution Atmospheric Transmission*) que converte os dados de radiância para reflectância na superfície terrestre.

Dessa forma, foram utilizados como dados de entrada os resultados da etapa anterior (radiância do topo da atmosfera), parte das informações necessárias para ajuste desta ferramenta são encontradas no arquivo MTL das imagens este que contém informações sobre o momento de aquisição das imagens (data e horário), outras informações como altitude do sensor, tamanho do pixel e latitude/longitude são preenchidas de forma automática.

Ainda nesta ferramenta e conforme metodologia de Silva (2017) e Vick (2019) foram definidos o tipo do sensor, neste caso MSS, TM ou OLI; para o modelo atmosférico a categoria Tropical; o modelo de aerossol foi ajustado para Rural; para a recuperação do aerossol foi definido 2-band (K-T) e a visibilidade inicial para 40 km. Feito isto, com o uso da ferramenta *Band Math* foi executada a normalização das imagens corrigidas através de uma função gaussiana.

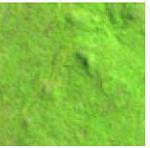
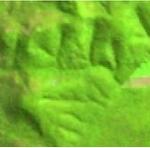
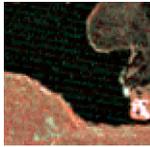
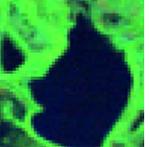
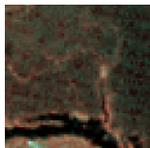
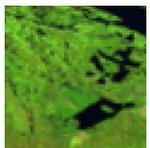
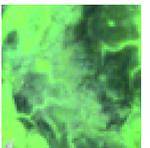
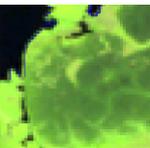
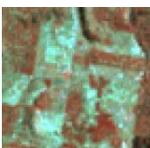
Por fim, realizou-se o recorte da área de estudo com a importação da delimitação gerada em etapa precedente em formato vetorial *shapefile*, esta foi convertida em formato ROI para que fosse possível executar o recorte das imagens através da ferramenta *Regions of*

*Interest – Subset Data From ROIs*, posteriormente o resultado dessa etapa foi exportado em formato IMG para ser utilizado nas etapas seguintes.

#### 4.5 Chave de interpretação das imagens

Afim de facilitar o processo de interpretação das imagens para a classificação do uso e cobertura da terra, foi utilizado as chaves de interpretação, visto que, segundo Florenzano (2007) independente da resolução e da escala, as imagens de satélite possuem elementos básicos para a sua interpretação, dessa forma podemos extrair informações da tonalidade/cor, textura, tamanho, forma, sombra, altura, padrão e localização. Na Tabela 4 são apresentadas as chaves de interpretação para cada ano e um registro fotográfico para cada uma das classes utilizadas no processo de classificação.

**Tabela 4** – Chaves de interpretação para os anos de 1975, 1985, 1994, 2005 e 2017.

Classes	1975	1985	1994	2005	2017	Foto
Vegetação						
Corpos hídricos						
Área Construída						
Área úmida						
Agropecuária						

Diante disso, a interpretação dos alvos foi realizada com a associação das 5 classes definidas anteriormente e utilizando 4 variáveis interpretativas sendo a textura, cor, tonalidade e formas geométricas das classes com base nas composições coloridas R4, G5, B6 para o satélite Landsat-2/MSS, a composição R5, G4, B3 para o satélite Landsat-5/TM e R6, G5, B4 para o satélite Landsat-8/OLI, conforme metodologia aplicada por Silva (2017) e Vick (2019).

#### 4.6 Segmentação das imagens

Este processo foi realizado por meio do *software* eCognition® 8.9 (TRIMBLE, 2013), as imagens para esta etapa foram importadas em formato IMG, após processo de pré-processamento. Para melhorar a visualização dos alvos nas imagens foi aplicado o realce, na sequência o contraste foi ajustado de forma manual os parâmetros da equalização, disponíveis na ferramenta *View – Image Layer Mixing*, ambos procedimentos foram realizados adotando as seguintes composições coloridas:

- Landsat 2 – MSS – R4 G5 B6
- Landsat 5 – TM – R5 G4 B3
- Landsat 8 – OLI – R6 G5 B4

A segmentação neste ambiente é realizada com uma abordagem de árvore de processos (*Process Tree*), dessa forma é possível realizar diferentes etapas para concluir a segmentação. Nesta etapa foi aplicado o algoritmo *Multiresolution Segmentation*, que pode ser inserido pela ferramenta *Insert Child*.

Esta foi aplicada utilizando os parâmetros de escala, forma e compacidade, utilizando conforme exposto na Tabela 5 todas as bandas disponíveis para cada imagem nos diferentes sensores e as imagens NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Build-up Index*) (JENSEN, 2009).

Para cada banda e imagem foram atribuídos pesos que determinam a sua importância para a distinção dos alvos durante o processo de segmentação de todas as cenas *Landsat*, neste sentido foram atribuídos maiores valores de relevância para as imagens NDBI para facilitar a segmentação da Área Construída, visto que possui relação direta com este índice.

**Tabela 5** – Valores de relevância para cada banda do Landsat 2/MSS, Landsat-5/TM e Landsat-8/OLI.

<i>Segmentation Settings</i>					
<b>Bandas Landsat 2/MSS</b>	<b>Pesos</b>	<b>Bandas Landsat 5/TM</b>	<b>Pesos</b>	<b>Bandas Landsat 8/OLI</b>	<b>Pesos</b>
1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	2	1
3	3	3	1	3	1
4	2	4	7	4	1
-	-	5	1	5	7
-	-	7	1	6	1
-	-	-	-	7	1
NDVI	-	NDVI	6	NDVI	6
NDWI	-	NDWI	5	NDWI	5
NDBI	-	NDBI	8	NDBI	8

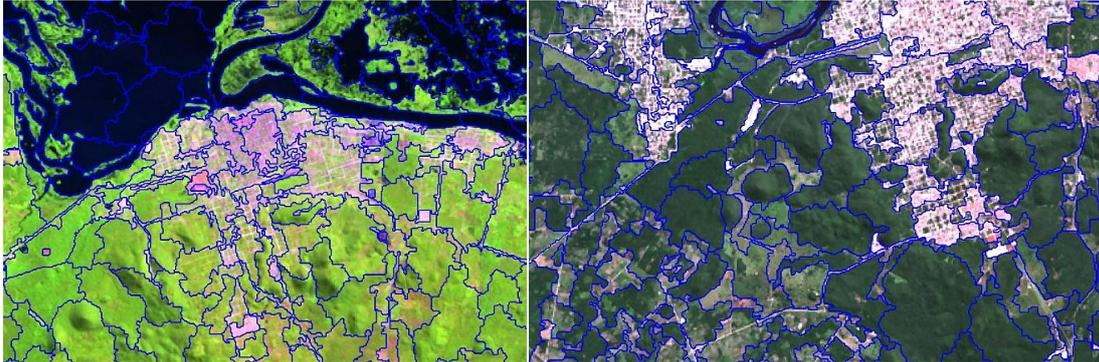
O segundo ajuste como exposto na Tabela 6 foi aplicado nos critérios de homogeneidade (*Composition of Homogeneity Criterion*) composto pelos atributos de escala, forma e compacidade dos objetos que serão segmentados, estes valores foram atribuídos com base nos trabalhos de Bacani et al (2016) e Vick (2019) aplicando o método “*trial and error*”, em que são realizados diversos testes para escolha da segmentação com a melhor distinção dos objetos na imagem.

**Tabela 6** – Valores de Escala, Forma e Compacidade utilizados no processo de segmentação.

<b>Ano da imagem</b>	<b>Escala</b>	<b>Forma</b>	<b>Compacidade</b>
1975	0.6	0.002	0.005
1985	3	0.002	0.6
1994	2	0.002	0.03
2005	2	0.002	0.5
2017	4	0.003	0.5

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos após a aplicação deste método nas imagens de satélite para o ano de 1994 (à esquerda) e para o ano de 2017 (à direita), onde podemos observar que este processo de segmentação apresenta resultados satisfatórios na identificação e distinção das classes estabelecidas para este trabalho.

**Figura 8** – Exemplos de segmentação para imagens Landsat 5/TM e Landsat 8/OLI.



#### 4.7 Classificação orientada a objeto

A etapa de classificação orientada ao objeto foi executada dentro do software eCognition® 8.9 (TRIMBLE, 2013). Seguindo as definições de Delfins (2012) foram coletados quantidade de objetos significativos nas imagens segmentadas para o treinamento do sistema, estas amostras foram selecionadas para cada uma das classes temáticas, sendo escolhidas através das chaves de interpretação das imagens e distribuídas de forma aleatória por toda as imagens.

Para executar a classificação foi escolhido o classificador *Nearest Neighbor* (Vizinho Mais Próximo). Entretanto, antes disto com a ferramenta *Edit Standard Nearest Neighbor Feature Space* foram adicionados parâmetros para potencializar o classificador, adicionando mais variáveis, contribuindo para o aumento da acurácia no reconhecimento e classificação dos objetos.

A definição destes parâmetros aplicados é apresentada na Tabela 7, e tiveram como embasamento os trabalhos de Bacani et al. (2016), Silva (2017) e Vick (2019), no entanto foram realizados testes para conseguir o melhor resultado de classificação.

**Tabela 7** – Parâmetros aplicados ao classificador NN.

Características do Objeto	Características Utilizadas
Customizado	NDVI; NDWI; NDBI
Valores de Layer	Brilho Média espectral das bandas e dos customizados Desvio padrão das bandas
Geometria	Extensão dos objetos (Área, Comprimento de borda; Comprimento; Número de pixels); Forma (Compacidade, Direção principal, Densidade); Baseado em Polígonos (Número de arestas e Desvio padrão do comprimento das arestas).

Após a execução da classificação, foi inserida uma nova *Child* na árvore de processos, com a execução da ferramenta *Merge Region* para cada uma das classes temáticas utilizadas com o intuito de realizar a fusão em objetos maiores aos obtidos anteriormente pela segmentação, e dessa forma facilitar o cálculo da área para cada classe temática. Por fim, os resultados foram exportados em formato IMG para os procedimentos seguintes.

#### **4.8 Validação estatística: acurácia global e estatística Kappa**

Os cálculos de validação estatística da classificação de uso e cobertura da terra desta pesquisa foram realizados dentro do *software* ENVI 5.3 (EXELIS, 2014). As amostras de referência utilizadas nessa etapa foram coletadas através de trabalho de campo com o uso de GPS e câmera fotográfica com GPS embutido, nas imagens da família Landsat utilizadas e em imagens de alta resolução disponíveis no *Google Earth Pro*.

A quantidade de amostras coletadas foi definida segundo Congalton (1991) sendo 75 amostras por classe temática, totalizando 375 amostras distribuídas de maneira aleatória por cada uma das imagens, aplicando assim a estratégia de amostragem aleatória estratificada. Entretanto, para o ano de 1975 devido a extensão reduzida da área construída foram coletadas apenas 55 amostras.

A coleta destas amostras fora realizada no *software* ArcGIS 10.2 (ESRI, 2012) em que para cada ano (1975, 1985, 1994, 2005, 2017) foi criado um arquivo vetorial de pontos contendo as informações sobre as classes definidas de uso e cobertura da terra. Após esse procedimento os arquivos foram importados para o *software* ENVI 5.3 (EXELIS, 2014) e convertidos para o formato ROI utilizando a ferramenta *Subset Data From ROIs*.

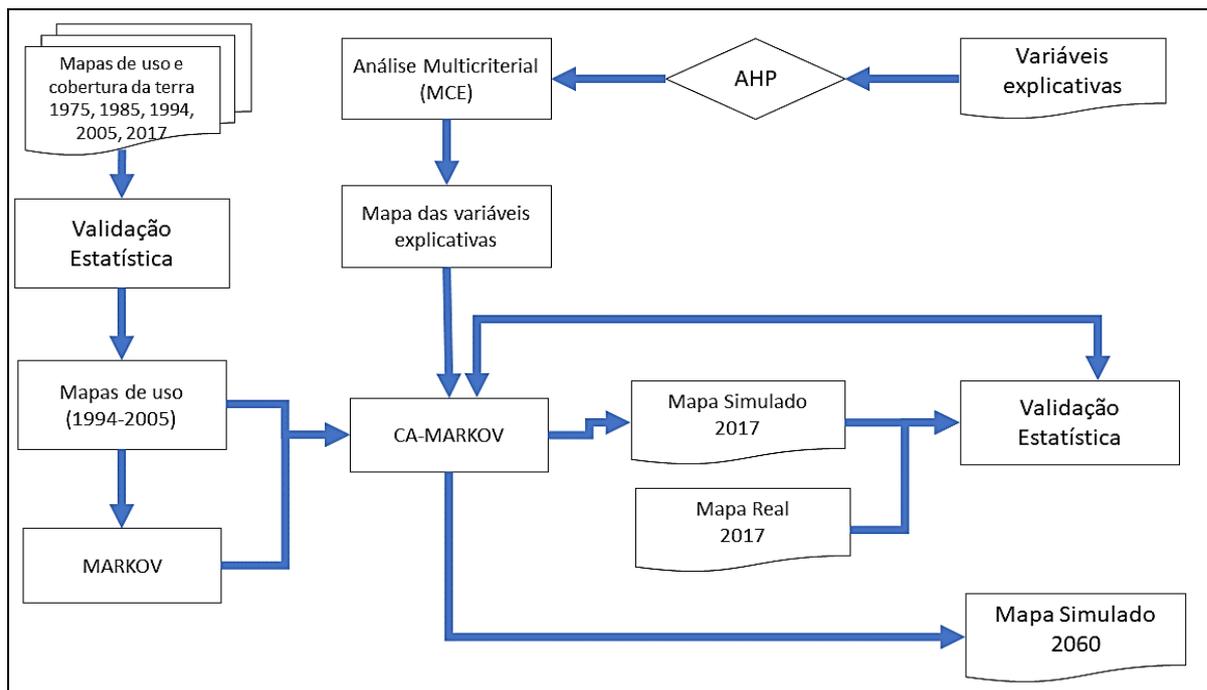
Com objetivo de elaborar a matriz de confusão os resultados da classificação de uso e cobertura da terra foram importadas em formato IMG para que fosse possível utilizar no ENVI 5.3 (EXELIS, 2014), onde através da ferramenta *Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs* elaborou-se a matriz de confusão para calcular a avaliação de acurácia com os coeficientes de Exatidão global e o índice *Kappa*, os resultados obtidos foram organizados em uma planilha no *Excel* 2016 e comparados aos valores elaborados por Landis e Koch (1977) apresentados anteriormente.

#### **4.9 Modelagem preditiva de uso e cobertura da terra**

A próxima etapa a ser executada será a simulação das mudanças no uso e cobertura da terra, bem como sua distribuição espacial para cenário futuro para o ano de 2060. Este processo será realizado no ambiente TerrSet (*Geospatial Monitoring and Modeling Software*),

aplicando o modelo CA-Markov que utiliza as teorias das cadeias de Markov e Autômatos Celulares. A utilização desta técnica tem aumentado nos últimos anos, principalmente para modelar e simular tendências futuras de mudanças no uso da terra e cobertura vegetal, como visto nos trabalhos de Dalmas (2013), Bacani et al. (2016), Silva (2017) e Vick (2019). A Figura 9 ilustra o fluxograma com as etapas que serão realizadas no processo para elaboração da modelagem preditiva.

**Figura 9** – Fluxograma metodológico para elaboração do modelo preditivo.



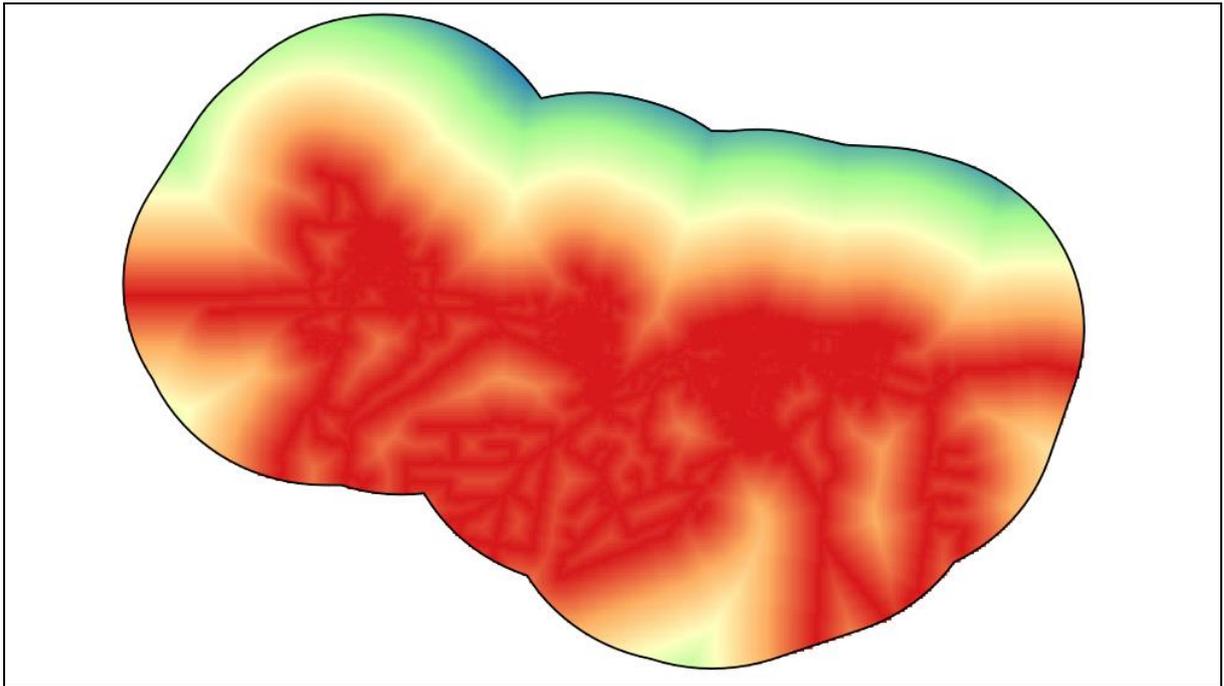
#### 4.9.2 Agentes Modificadores

Com a intenção de auxiliar na elaboração do modelo foram definidos os agentes modificadores do uso da terra e da cobertura vegetal, estes utilizados como variáveis explicativas para auxiliar na explicação sobre o processo de expansão da área construída, sendo estes: declividade, distância das vias de acesso, distâncias dos núcleos urbanos, distâncias dos corpos hídricos, distância das áreas de proteção permanente.

A partir disso, dentro do software *ArcGis 10.2* (ESRI, 2012) para cada variável foram elaborados mapas de distância euclidiana utilizando a ferramenta *Euclidean Distance*, que realiza o cálculo da distância de uma célula de origem até o centro de todas as células vizinhas. Na sequência estas variáveis foram classificadas através da lógica *Fuzzy* com a aplicação da ferramenta *Fuzzy Membership*, que produz como resultados mapa com valores entre 0.00 e 1, em que os valores próximos 1 representam maior influência sobre a expansão

das Áreas Construídas e quanto mais próximos de 0 possuem menor possibilidade de transformação em áreas construídas, conforme podemos verificar no exemplo da Figura 10 com os resultados para análise da distância das vias de acesso, em que a cor vermelha representa os locais com maiores influência sobre a conversão para Área Construída, e a medida que avança para a cor azul essa influência é reduzida.

**Figura 10** – Mapa de distância euclidiana das vias de acesso na área de estudo.



Todos os arquivos gerados foram exportados em formato ASCII para facilitar o processo de importação dentro do software *TerrSet*, e assim, evitar distorções nas informações que são necessários nos procedimentos seguintes.

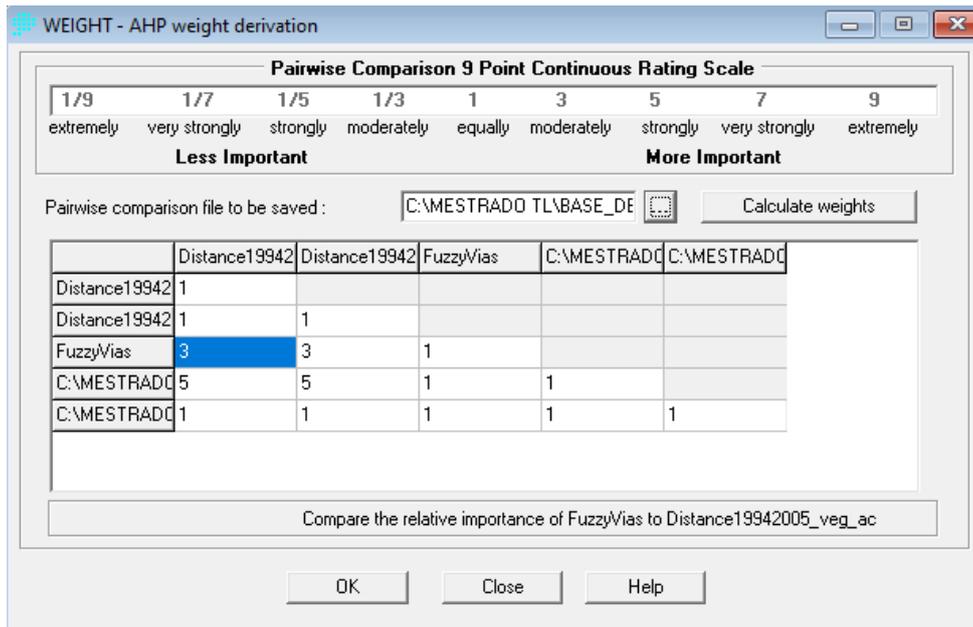
#### **4.9.3 Método AHP e Análise multicriterial**

Após a elaboração das variáveis explicativas, as mesmas foram submetidas ao método de ponderação AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Esta etapa foi realizada no software *TerrSet* com a aplicação da ferramenta *Weight* que executa uma comparação pareada entre todas as variáveis explicativas em que são definidos pesos para cada uma destas, estes valores definem a importância de cada variável em relação a outra no processo de expansão da Área Construídas (Figura 11).

Seguindo a proposta de Satty (2008) os valores de importância são inseridos em uma matriz que cruza os valores de cada variável e como resultado gera uma combinação de

valores hierarquicamente organizados que definem quais variáveis possuem maior influência nas mudanças no uso da terra e cobertura vegetal, essa escala tem uma variação iniciada no extremamente menos importante (valor 1/9) e finalizada no extremamente importante (valor 9). Após alguns testes com diferentes pesos foi obtido o valor de consistência 0.06 considerado aceitável.

**Figura 11** – Valores utilizados no método AHP com a ferramenta Weight.



Os valores obtidos para cada variável com a aplicação do método AHP foram utilizados como dados de entrada para a análise multicriterial (MCE) que foi realizada também no TerrSet com aplicação da ferramenta MCE que gerou como resultado uma espacialização contendo a combinação da influência das variáveis resultantes do método AHP com variação de valores entre 0 a 255. Nesta etapa foi utilizada uma camada máscara, para que não fossem realizados cálculos para as classes das Áreas Úmidas e Corpos Hídricos, pois como visto anteriormente estas sofrem com sazonalidades que alteram a espacialização das mesmas, sendo que não influenciam no objetivo proposto neste trabalho.

#### 4.9.4 Elaboração e calibração do modelo CA Markov

Para elaborar o modelo preditivo dentro do TerrSet na primeira etapa foi utilizada a ferramenta *MARKOV*, onde foram inseridos os mapas dos anos de 1994 e 2005. Como resultado desta ferramenta produziu-se uma matriz de probabilidade de transição, conforme a Quadro 6. Este arquivo registra a possibilidade de mudança das classes de uso da terra e cobertura vegetal no intervalo de 11 anos, onde os valores mais próximos de 1 possuem

menor probabilidade de alteração no uso e cobertura da terra. Por fim, foi gerado também para cada classe temática uma imagem com a probabilidade de transição.

**Quadro 6** - Matriz de probabilidade de transição das classes temáticas no período 1994-2005.

	Vegetação	Área Construída	Área Úmida	Agropecuária	Corpos Hídricos
Vegetação	0.7266	0.0393	0.0139	0.2190	0.0011
Área Construída	0.1672	0.7593	0.0105	0.0577	0.0053
Área Úmida	0.0310	0.0056	0.7508	0.0048	0.2079
Agropecuária	0.4369	0.0610	0.0052	0.4963	0.0007
Corpos Hídricos	0.0010	0.0022	0.4149	0.0006	0.5814

Para gerar a simulação do cenário para o ano de 2017 com a ferramenta *CA\_MARKOV*, foram utilizados como dados de entrada: o mapeamento para o ano de 2005; a matriz com as probabilidades de transição entres os anos de 1994 e 2005; por último, foi inserido o *Raster Group* composto pela coleção de imagens de probabilidade de transição para cada classe temática e a imagem de adequação de transição elaborada através da ferramenta MCE.

Após a elaboração do mapa simulado de 2017 será verificada a acurácia em comparação com o mapa real de 2017 (elaborado em uma etapa anterior) através do índice *Kappa* (LANDIS; KOCH, 1977). O resultado dessa avaliação precisa ser superior a 0,8 para que o modelo apresente forte capacidade de previsão, e desta forma, seja possível realizar projeções futuras. Por fim, o mapa simulado foi submetido a mais uma validação através da ferramenta *VALIDATE* do software *TerrSet (Geospatial Monitoring and Modeling Software)* que apresenta mais opções de índices estatísticos como o *Kappa Standard*, *Kappa for location* e *Kappa for quantity*, estes que foram aplicados para validação em modelagem por Araya e Cabral (2010), Bacani et al. (2016), Silva (2017) e Vick (2019).

#### 4.9.5 Simulação do cenário preditivo para 2060

A execução da simulação do cenário para 2060 utiliza os processos semelhantes ao que foram executados na etapa anterior, alterando os dados de entrada. Na ferramenta *MARKOV* com os mapas dos anos de 2005 e 2017 teve como resultado a matriz de probabilidade de transição entre estes anos e também os mapas de probabilidade para cada uma das classes. Após isso, foi elaborado um novo *Raster Group* (QUADRO 7) contendo as imagens de probabilidade de transição para as classes (1) Vegetação, (3) Área Úmida, (4)

Agropecuária, (5) Corpos hídricos, e no lugar da imagem referente a (2) Área Construída foi inserida a imagem de adequação resultante da análise multicriterial (MCE).

**Quadro 7** – Composição de imagens do *Raster Group*.

<b>Imagem do <i>Raster Group</i></b>	<b>Classe</b>
Probabilidade Transição Vegetação	1
Imagem de Adequação MCE	2
Probabilidade Transição Área Úmida	3
Probabilidade Transição Agropecuária	4
Probabilidade Transição Corpos Hídricos	5

Na sequência, com para execução da ferramenta *CA\_MARKOV* foram inseridos como dados de entrada: o mapeamento do ano de 2017, a matriz de probabilidades de transição entre os anos de 2005 e 2017, e o *Raster Group* elaborado na etapa anterior. Feito isso, foram aplicadas 43 interações referente aos 43 anos que serão projetados até 2060, utilizando o filtro de autômato celular *5x5 Standart Contiguity Filter*.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Avaliação do desempenho do mapeamento multitemporal de uso e cobertura da terra

A aplicação do método GEOBIA para a elaboração dos mapas temáticos na área de estudo apresentou excelentes resultados estatísticos quando avaliados na escala de Landis e Koch (1977). A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos através da aplicação dos cálculos do coeficiente *Kappa* e acurácia global utilizados para avaliar a exatidão da classificação nos diferentes anos que foram mapeados.

**Tabela 8** – Resultados do cálculo do coeficiente *Kappa* e Acurácia Global para o mapeamento de uso da terra e cobertura vegetal.

Datas das imagens	Estatística <i>Kappa</i>	Acurácia Global
1975	0,8124	85,07%
1985	0,9600	96,80%
1994	0,9800	98,40%
2005	0,9767	98,13%
2017	0,9557	96,46%

Em todos os anos que foram mapeados os resultados da avaliação da acurácia da classificação em imagens de média resolução espacial tiveram resultados excelentes segundo a tabela de concordância de Landis e Koch (1977), visto que, os resultados foram superiores a 0,81, e isto representa que o mapeamento está quase perfeito e muito fiel a realidade existente.

Para o ano de 1975, a validação utilizando pontos de amostras na imagem do satélite Landsat 2/MSS como verdade terrestre, apresentou o menor valor do índice *Kappa* e acurácia global, os conflitos nos resultados estão relacionados principalmente as classes de Agropecuária. A Tabela 9 apresenta os resultados percentuais da validação das classes mapeadas em comparação com as verdades terrestre, sendo uma medida voltada ao quanto da classificação está acordado com os dados de referência (CAMPBELL E WYNNE, 2011).

**Tabela 9** – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 1975.

Classes	Área Construída	Corpos hídricos	Área Úmida	Agropecuária	Vegetação
Área Construída	81,82	0	0	0	0
Corpos hídricos	0	98,67	2,67	0	0
Área Úmida	1,82	0	95	1,33	0
Agropecuária	14,55	0	0	49,33	0
Vegetação	1,82	1,33	2,67	49,33	100

A classe definida como Agropecuária está associada às áreas em que foram extraídas a vegetação natural para o uso antrópico com cultivos agrícolas e/ou para pecuária representados na Figura 12. Essa confusão pode ser explicada pela resolução espacial de 80 metros que dificulta a detecção de objetos pequenos no processo de segmentação para, adicionalmente, a resolução espectral marcada pela quantidade reduzida de bandas disponíveis no satélite Landsat 2 MSS contribui para dificultar a distinção entre os diferentes objetos da imagem.

Outro importante fator a ser considerado refere-se à resolução radiométrica deste sensor com 6 bits que resulta em pequena faixa de valores de níveis de cinza, estes que representam a intensidade da radiância na área do terreno correspondente ao pixel, e isto dificulta a identificação dos alvos no processo de segmentação. Segundo Alves et al. (2009) as limitações dos produtos do Landsat 2 MSS aumentam os erros de inclusão, uma vez que, impactam de maneira direta na classificação de áreas de solo exposto preparados para agricultura ou áreas de mineração localizadas próximas da borda nos limites do rural-urbano, sendo classificadas frequentemente como áreas urbanas.

**Figura 12** – Representação da classe temática Agropecuária.



**Foto:** CABRERO, D. R. O. Trabalho de campo em julho/2019.

A Tabela 10 apresenta os resultados em percentual da acurácia do produtor e do usuário, como também os erros de omissão e comissão obtidos a partir do mapeamento do ano de 1975. Neste sentido a acurácia do produtor tem como objetivo medir o quanto uma determinada área foi classificada corretamente pelo pesquisador, complementada pelo erro de omissão que avalia a proporção de características definidas nas amostras coletadas como verdadeiras que não foram classificadas no mapa (BANKO, 1998).

**Tabela 10** – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 1975.

Classes	Acurácia do Produtor	Erros de Omissão	Acurácia do Usuário	Erros de Comissão
Área Construída	81,82	18,18	100	0
Corpos hídricos	98,67	1,33	97,37	2,63
Área Úmida	94,67	5,33	97,26	2,74
Agropecuária	49,33	50,67	82,22	17,78
Vegetação	100	0	64,66	35,34

Por outro lado, a acurácia do usuário avalia a confiabilidade do mapa, medindo o quanto o mapa realmente representa a verdade terrestre, desta forma, o erro de comissão representa a quantidade de amostras utilizadas como verdade terrestre que estão distintas daquelas mapeadas (BANKO, 1998).

Diante dos resultados obtidos na Tabela 10 sobre a acurácia do produtor é possível notar que a classe de Vegetação para este ano apresentou a maior precisão na classificação, com 100%. No entanto, esta mesma classe apresentou o menor percentual de acurácia do usuário, com 64,66%, este valor representa a probabilidade de o pixel classificado na imagem representar a categoria descrita no campo, conseqüentemente a vegetação apresentou 35,34% de erros de comissão que representa o percentual de amostras classificadas como outra classe.

Na Tabela 11 estão representados os percentuais de acerto e erro de concordância para cada classe mapeada no ano de 1985, diante do exposto a classe da Agropecuária também apresentou maior percentual de confusão, no entanto com valores menores em comparação ao ano de 1975, em que 5,33% foi confundido com vegetação e 2,67% com área construída. Esse fato pode ser explicado pela resolução espacial do satélite Landsat 5/TM, de 30 metros, como também pela presença rarefeita de espécies de vegetação arbórea e pequenas construções dentro das propriedades rurais, e isto, contribui para a confusão ocorrida durante o processo de classificação.

**Tabela 11** – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 1985.

Classes	Corpos hídricos	Área Úmida	Área Construída	Agropecuária	Vegetação
Corpos hídricos	100	1,33	0	0	0
Área Úmida	0	96	0	0	0
Área Construída	0	0	97	2,67	0
Agropecuária	0	0	1,33	92	1,33
Vegetação	0	2,67	1,33	5,33	98,67

A Tabela 12 mostra que para o ano de 1985 para a classe de Agropecuária a acurácia do produtor teve o resultado de 92% com 8% de erros de omissão, enquanto a acurácia do usuário obteve 97,18%. Por outro lado, a classe de vegetação apresentou a menor acurácia do usuário com 91,36% e o maior valor de erros de comissão, com 8,64%, estes resultados indicam que a confiabilidade desta classe foi reduzida, visto que, as amostras definidas como verdade terrestre estão distintas do que foi mapeado.

**Tabela 12** – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 1985.

Classes	Acurácia do Produtor	Erros de Omissão	Acurácia do Usuário	Erros de Comissão
Corpos hídricos	100	0	98,68	1,32
Área Úmida	96	4	100	0
Área Construída	97,33	2,67	97,33	2,67
Agropecuária	92	8	97,18	2,82
Vegetação	98,67	1,33	91,36	8,64

Para o ano de 1994, conforme a Tabela 13 demonstra os resultados da classificação com método GEOBIA foram excelentes, visto que, as classes com menor percentual de concordância foram os Corpos hídricos e a Agropecuária, com 97,33%. Neste sentido, a classe temática Corpos hídricos apresentou pequena confusão com a classe área úmida, com 2,67%, este fato pode ser explicado pela presença de áreas alagadas neste período do ano na região.

**Tabela 13** – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 1994.

Classes	Corpos hídricos	Área Úmida	Área Construída	Agropecuária	Vegetação
Corpos hídricos	97,33	0	0	0	0
Área Úmida	2,67	98,67	0	0	0
Área Construída	0	0	98,67	2,67	0
Agropecuária	0	0	1,33	97,33	0
Vegetação	0	1,33	0	0	100

Por outro lado, a Tabela 14 mostra que as classes com a menor confiabilidade para este ano, expressa pela acurácia do usuário foram a Área Úmida e Área Construída, ambas com o 97,37%, com erro de comissão de 2,63%. Em contrapartida, a classe de Vegetação apresentou 100% de acurácia do produtor, bem como os Corpos hídricos que apresentaram 100% para a acurácia do usuário, resultados estes gerados em virtude da homogeneidade existente nestas duas classes que facilita a identificação dos alvos.

**Tabela 14** – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 1994.

Classes	Acurácia do Produtor	Erros de Omissão	Acurácia do Usuário	Erros de Comissão
Corpos hídricos	97,33	2,67	100	0
Área Úmida	98,67	1,33	97,37	2,63
Área Construída	98,67	1,33	97,37	2,63
Agropecuária	97,33	2,67	98,65	1,35
Vegetação	100	0	98,68	1,32

Conforme apresentado na Tabela 15, para o mapeamento do ano de 2005, assim como no ano de 1994, os menores valores de concordância foram nas classes de Área úmida e Agropecuária, respectivamente com 97,33% e 98,67%. Entretanto as outras classes apresentaram resultados excelentes com 100% de concordância entre as classes temáticas mapeadas e as amostras de verdade terrestre.

**Tabela 15** – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre para o ano de 2005.

Classes	Corpos hídricos	Área Construída	Área Úmida	Agropecuária	Vegetação
Corpos hídricos	100	0	2.67	0	0
Área Construída	0	100	0	0	0
Área Úmida	0	0	97.33	0	0
Agropecuária	0	0	0	98.67	0
Vegetação	0	0	0	1.33	100

Para o ano de 2005, conforme exposto na Tabela 16 as classes de Área Úmida e Agropecuária apresentaram os menores percentuais de acurácia do produtor, respectivamente com 97,33% e 98,67% e conseqüentemente os maiores percentuais de erros de comissão com 2,67% e 1,33%. No entanto, o alto percentual obtido em nas classes mapeadas neste ano reforça a eficiência do método GEOBIA, uma vez que, a acurácia do produtor demonstra de forma estatística a exatidão na classificação destas áreas.

**Tabela 16** – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 2005.

Classes	Acurácia do Produtor	Erros de Omissão	Acurácia do Usuário	Erros de Comissão
Corpos hídricos	100	0	97,4	2,6
Área Construída	100	0	100	0
Área Úmida	97,33	2,67	100	0
Agropecuária	98,67	1,33	100	0
Vegetação	100	0	98,68	1,32

Conforme a Tabela 17 o mapeamento para o ano de 2017 apresentou a menor concordância para a classe de Área úmida, com 88,16%, apresentando valores de confusão com as classes de Corpos hídricos e Vegetação que apresentaram respectivamente 2,6% e 1,32% de erros de comissão, este fato pode ser explicado conforme podemos observar na Figura 13 pois na classe Áreas Úmidas existem na composição da paisagem os elementos como, vegetação e água, que também existem nas classes anteriormente mencionadas, tais características produzem dificuldades para a distinção dos alvos durante o processo de classificação GEOBIA, gerando dessa forma maiores erros de comissão.

**Tabela 17** – Percentual de concordância entre as classes mapeadas e a verdade terrestre o ano de 2017.

Classes	Corpos hídricos	Área Úmida	Área Construída	Agropecuária	Vegetação
Corpos hídricos	100	10,53	0	0	0
Área Úmida	0	88,16	0	0	0
Área Construída	0	0	97,33	0	0
Agropecuária	0	0	0	98,67	1,35
Vegetação	0	1,32	2,67	1,33	98,65

**Figura 13** – Representação da classe temática Área Úmida.



**Foto:** CABRERO, D. R. O. Trabalho de campo – julho/2019.

Os resultados exibidos na Tabela 18 colaboram com a afirmação anterior sobre a confusão entre algumas classes ao apontar que para o mapeamento de 2017 os erros de omissão para a classe Área Úmida foram de 11,84%, enquanto os erros de comissão mais elevados foram para as classes de Corpos hídricos e Vegetação, respectivamente com 10,67% e 5,19%. Por outro lado, a classificação da Área Construída obteve excelentes resultados com

97,33 % de acurácia do produtor e apenas 2,67% de erros de comissão, contribuindo para eficácia deste estudo.

**Tabela 18** – Percentual de probabilidade das variáveis acurácia do produtor e acurácia do usuário para o ano de 2017.

Classes	Acurácia do Produtor	Erros de Omissão	Acurácia do Usuário	Erros de Comissão
Corpos hídricos	100	0	89,33	10,67
Área Úmida	88,16	11,84	100	0
Área Construída	97,33	2,67	100	0
Agropecuária	98,67	1,33	98,67	1,33
Vegetação	98,65	1,35	94,81	5,19

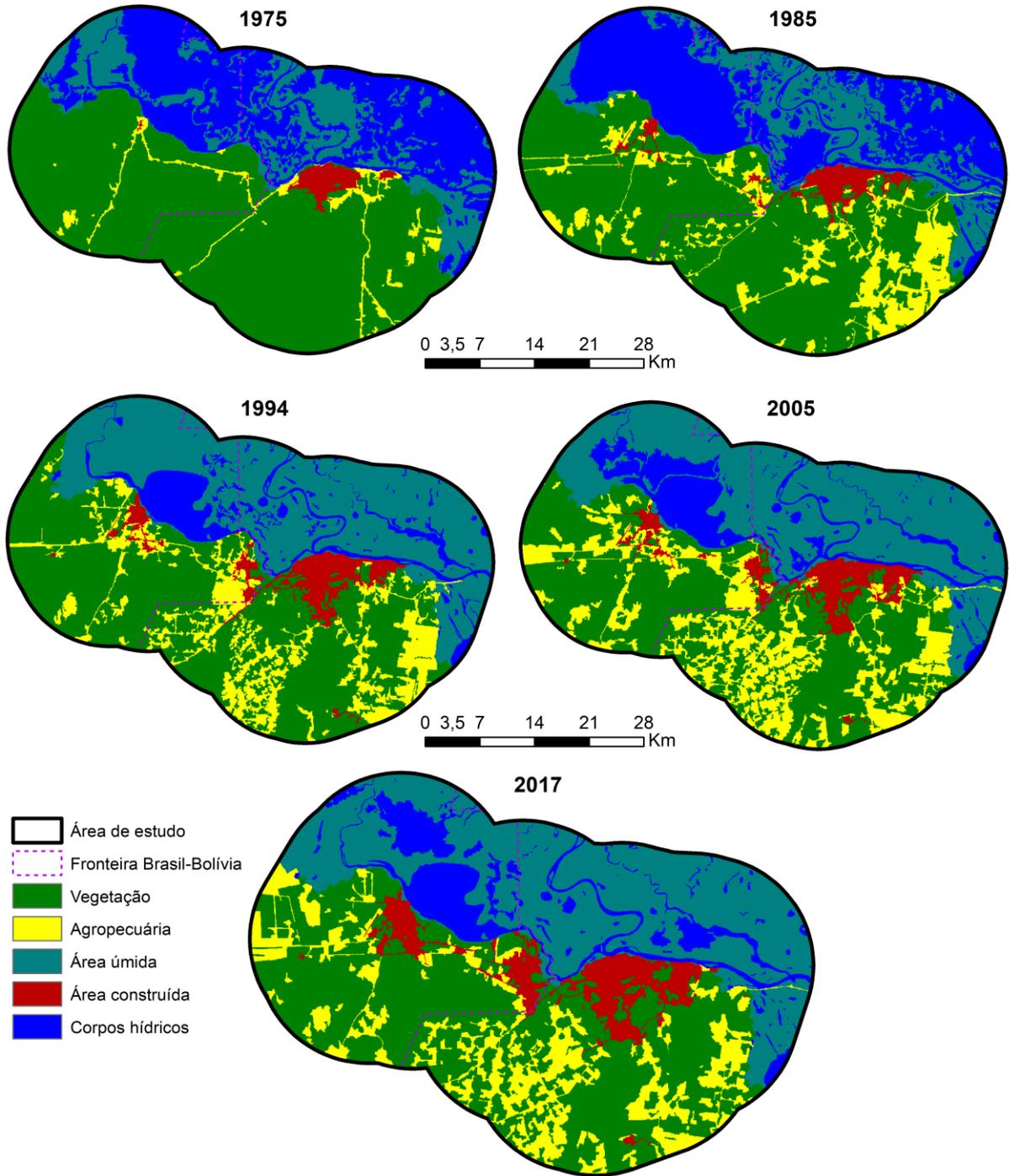
## 5.2 Análise multitemporal de uso e cobertura da terra

Após a classificação do uso e cobertura da terra para os anos de 1975, 1985, 1994, 2005 e 2017 foi possível realizar uma análise multitemporal sobre as mudanças espaciais ocorridas durante o período analisado. A Figura 14 apresenta a espacialização das classes de uso e cobertura da terra para a área de estudo, nela é possível visualizar a expansão das Área Construída e Agropecuária que substituíram de maneira gradual as áreas de Vegetação nesse período de 42 anos.

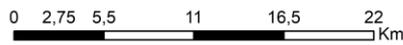
Por outro lado, na Figura 14, é possível visualizar as alterações nas Áreas úmidas e nos Corpos Hídricos decorrentes das dinâmicas das cheias do rio Paraguai que ocorrem anualmente dentro da área do Pantanal influenciando diretamente na espacialização destas classes na área de estudo desta pesquisa.

Em relação a classe Área Construída (Figura 14) podemos inferir que visualmente o desenvolvimento da malha urbana das cidades de Puerto Suarez e Puerto Quijarro teve pequena expansão até o ano de 1985 e com grande expansão no entre os anos de 2005 e 2017. A Figura 14 destaca também a importância de Corumbá como principal núcleo urbano da região fronteira desde o ano de 1975, visto que, conforme podemos observar a malha urbana apresentou maior extensão em todo o período analisado.

Figura 14 – Mapeamento das classes de uso e cobertura da terra.



-  Área de estudo
-  Fronteira Brasil-Bolívia
-  Vegetação
-  Agropecuária
-  Área úmida
-  Área construída
-  Corpos hídricos

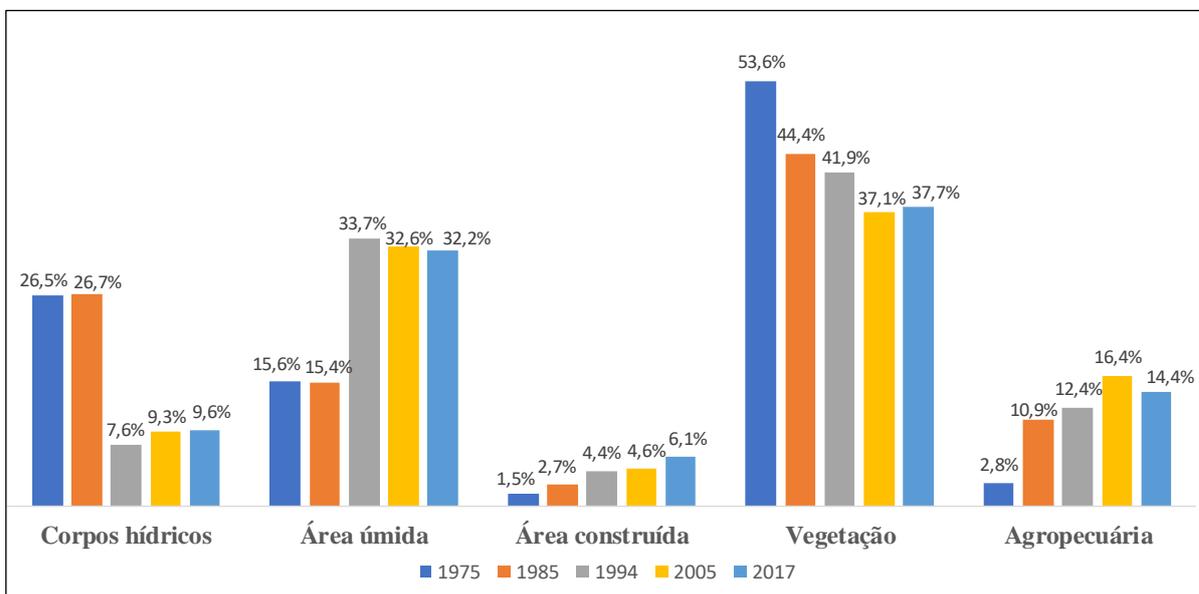


UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL  
Programa de Pós-Graduação em Geografia  
Fonte: Landsat 2/MSS; Landsat 5/TM; Landsat 8/OLI  
Sistema de coordenadas: WGS 84 Zona 21S  
Organização: CABRERO, D. R. O. (2019)



A Figura 15 apresenta a área em percentual para cada classe de uso e cobertura da terra em todos os anos que foram mapeados. Diante destes resultados, podemos afirmar que a classe de Vegetação teve uma redução de 15,6% (128,69 km<sup>2</sup>) neste período, uma vez que, em 1975 representava 53,6% (435,6 km<sup>2</sup>) e em 2017 sua área ocupava 37,7% (306,98 km<sup>2</sup>). Por outro lado, a classe de Agropecuária apresentou um crescimento de 11,6% (93,9 km<sup>2</sup>) no período em estudo, visto que, em 1975 representava uma área de 2,8% (22,9 km<sup>2</sup>) e em 2017 passou a ocupar 14,4% (116,89 km<sup>2</sup>) da área de estudo.

**Figura 15** – Representação em percentual dos valores para análise multitemporal de uso e cobertura no período entre 1975-2017.



No período analisado as Áreas Construídas tiveram uma expansão de 37,44 km<sup>2</sup>, sendo que em 1975 ocupavam apenas 1,5% da área de estudo e em 2017 passaram a ocupar 6,1% deste espaço, substituindo prioritariamente áreas que antes eram ocupadas com Agropecuária. Em todas as cidades analisadas observa-se que a expansão da Área Construída ocorreu principalmente na direção sul, visto que, ao norte esta expansão é limitada pela presença do Pantanal com extensas planícies inundáveis influenciada pelo regime hidrológico do rio Paraguai.

Em Corumbá essa expansão em direção ao sul foi marcada principalmente pela ocupação de áreas de fundos de vale e encostas de morrarias, como o Cruzeiro e Pico de Corumbá. Este processo de ocupação teve na década de 1990 efetiva participação da iniciativa estatal com a implantação de conjuntos populares como Jardimzinho, Guanabara, Primavera e Guatós (PEREIRA, 2007).

A Tabela 19 apresenta a evolução espacial das classes temáticas para os anos analisados, sendo que as cidades foram agrupadas pelo lado da fronteira do qual pertencem. Nela é possível constatar que nas cidades de Puerto Quijarro e Puerto Suarez, a expansão da Área Construída foi de 5,8% (19,2 km<sup>2</sup>) durante o período, posto isso, fica evidente o crescimento da área urbana nesses municípios, resultados da política implementada pelo governo boliviano em 1984 para estimular a ocupação nesta região da Bolívia (MANETTA, 2009).

Esta expansão nas cidades bolivianas ocorre principalmente no sentido sudeste, em Puerto Quijarro essa direção do crescimento tem relação com a proximidade da fronteira com o Brasil e com a expansão do comércio nas proximidades. Em Puerto Suarez o crescimento das Áreas construídas vem ocorrendo de forma mais acentuada na direção sul, com destaque para a expansão em áreas próximas a ferrovia que possui ligação com as cidades de Corumbá e Santa Cruz de la Sierra.

No território brasileiro da fronteira, entre 1975-2017 as cidades de Corumbá e Ladário tiveram expansão superior ao dobro da Área Construída, registrando um aumento de 3,58%, em consequência da expansão da malha urbana ocorrida em ambos os municípios, pressupomos que este crescimento pode ter dado início, da perspectiva da forma, no processo de conurbação entre as cidades a partir da década de 1980.

**Tabela 19** – Evolução espacial da área ocupada pelas classes temáticas em km<sup>2</sup> e % por lado da fronteira.

Cidades	Classe	1975		1985		1994		2005		2017	
		km <sup>2</sup>	%								
Puerto Quijarro/ Puerto Suarez	Corpos hídricos	88	26,8	110	33,4	35	10,5	50	15,2	48	14,8
	Área úmida	47	14,2	28	8,5	94	28,7	84	25,5	85	26,0
	Área construída	0,2	0,1	4,4	1,3	9,6	2,9	11	3,2	19	5,9
	Vegetação	186	56,6	162	49,1	160	48,5	140	42,6	137	41,7
	Agropecuária	7,5	2,3	25	7,6	31	9,4	44	13,5	38	11,5
Corumbá/ Ladário	Corpos hídricos	127	26,3	107	22,1	27	5,7	26	5,3	29	6,0
	Área úmida	80	16,6	97	20,1	179	37,1	181	37,5	176	36,4
	Área construída	12	2,5	17	3,6	26	5,4	27	5,6	30	6,3
	Vegetação	249	51,5	199	41,1	181	37,4	161	33,3	170	35,0
	Agropecuária	15	3,2	63	13,1	70	14,5	89	18,4	79	16,3

No período analisado em toda a área de estudo observou-se uma expansão das áreas de Agropecuária que tiveram um acréscimo de 11,6%, visto que, em 1975 ocupavam 2,8% e em

2017 atingiram 14,4% com uma área de 38,04 km<sup>2</sup>, em comparação com o ano de 2005 ocorreu uma redução de 2% na área total desta classe. No território brasileiro da fronteira, houve entre 1975-2017 uma expansão de 13,1% nas áreas de Agropecuária representando um crescimento de 63,48 km<sup>2</sup>, por consequência deste processo as áreas de Vegetação tiveram uma redução de 16,5% (79,65 km<sup>2</sup>) no mesmo período analisado.

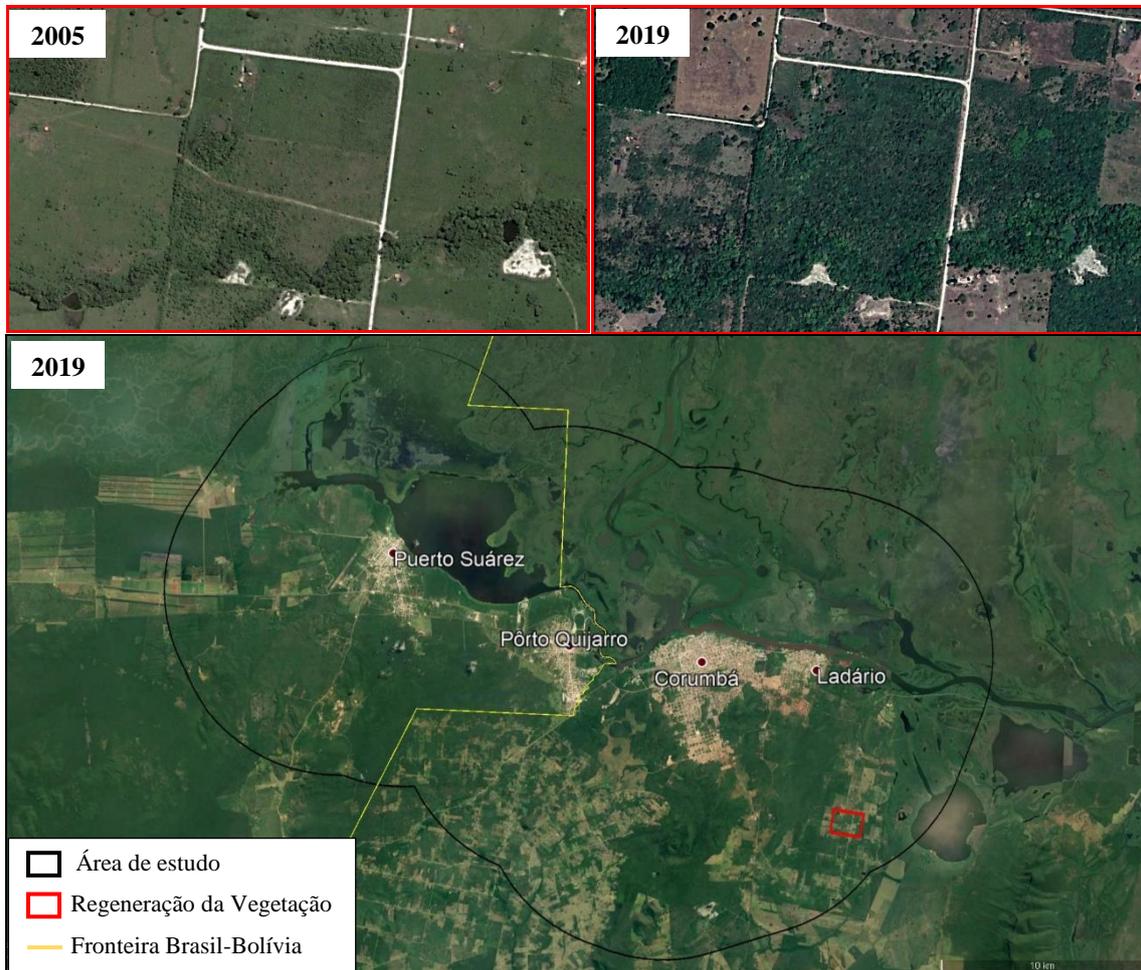
Desta forma, podemos afirmar que o processo de expansão das áreas de Agropecuária no território brasileiro apresentou maior intensidade de crescimento observado no mesmo período no território boliviano, sendo 3,9% maior. Essa expansão no território brasileiro da área de estudo ocorreu principalmente na direção sudoeste da área urbana de Corumbá e a sudeste da cidade de Ladário, isto é justificado pela implementação de assentamentos rurais nessa região durante as décadas de 1980 e 1990, sendo que em Corumbá foram criados os assentamentos Tamarineiro, Taquaral, Paiolzinho e Urucum e em Ladário o assentamento 72 (INCRA, 2019).

Sendo assim, no período analisado 1975-2017 constatou-se dentro da área de estudo que no território brasileiro da fronteira, situado dentro dos municípios de Corumbá e Ladário houve um crescimento das classes de Área Construída e Agropecuária resultantes das alterações nas dinâmicas populacionais e econômicas. Enquanto a classe de Vegetação expressou redução até o ano de 2005, e no período seguinte até 2017 apresentou pequeno crescimento resultante do processo de regeneração. No território boliviano destaca-se o crescimento da Área construída resultante das ações do governo para ocupação e desenvolvimento nesta região, que em contrapartida colaborou para a redução da classe de Vegetação durante todo o período analisado.

Em relação a classe temática Vegetação no território brasileiro da fronteira ocorreu uma redução de 18,2% na área ocupada no período de 1975-2005, resultante principalmente do crescimento dos assentamentos rurais. No entanto, entre 2005-2017 houve um aumento de 1,7%, isto pode ser justificado, pois segundo relatório técnico do INPE e Fundação SOS Mata Atlântica (2019) o município de Corumbá foi o segundo no estado do Mato Grosso do Sul, que mais apresentou áreas regeneradas no período de 1985-2015 com cerca de 1.674 hectares, neste estudo são consideradas áreas que foram utilizadas por pastagem e atualmente estão em avançado estado de regeneração. Na Figura 16 é possível visualizar com imagens de alta resolução espacial do *Google Earth* uma área localizada no município de Ladário dentro do

Assentamento 72, onde a cobertura sofreu significativas alterações no intervalo entre 2005-2019 devido ao processo de regeneração da vegetação.

**Figura 16** - Representação de área com processo de regeneração da vegetação.



**Fonte:** Google Earth, 2019, acesso em 20/08/2019.

As áreas com Corpos hídricos e Áreas úmidas apresentaram alterações que salientam as interações constantes entre as classes, uma vez que, nos anos de 1975 e 1985 conforme apresentado anteriormente nos mapas de uso da terra e cobertura vegetal ocorreram grandes cheias no Pantanal, dessa forma a água ocupou de maneira momentânea grandes extensões de Áreas úmidas, no entanto, nos anos seguintes (1994, 2005 e 2017) que foram mapeados, devido as cheias no rio Paraguai com menor intensidade as Áreas úmidas apresentaram maior percentual de cobertura na área de estudo.

**Figura 17** – Classificação das cheias em Ladário-MS entre 1900 e 2009.

coluna + linha = ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1900	4,3	4,4	5,0	2,7	5,0	6,6	5,6	3,7	3,7	2,8
1910	1,8	2,2	5,1	6,4	3,6	1,5	3,3	5,1	3,5	3,0
1920	6,4	6,1	4,3	5,5	3,4	2,3	5,5	4,1	2,9	5,3
1930	5,2	5,5	6,0	5,1	4,0	5,7	2,3	2,4	1,6	2,0
1940	5,0	2,0	5,3	5,0	2,0	5,2	4,2	4,6	1,9	5,3
1950	5,1	4,2	4,6	2,9	4,4	2,6	4,3	4,2	5,0	5,9
1960	4,9	4,3	2,3	4,5	1,3	2,7	2,5	1,6	2,1	1,8
1970	2,1	1,1	1,9	2,1	5,5	4,3	4,9	5,5	5,4	6,3
1980	6,2	5,5	6,6	5,4	5,1	6,1	4,3	5,0	6,6	6,1
1990	4,5	5,5	5,4	5,2	3,9	6,6	5,1	5,7	4,6	4,6
2000	4,7	3,2	5,1	5,2	4,3	3,3	5,4	5,1	5,2	3,3

**Legenda:**

	Cheia superior a 6 metros		Anos seguidos de cheia inferior a 3 metros
	Cheia inferior a 3 metros		Menores cheias entre 2000-2009

**Fonte:** BERGIER; RESENDE, 2010.

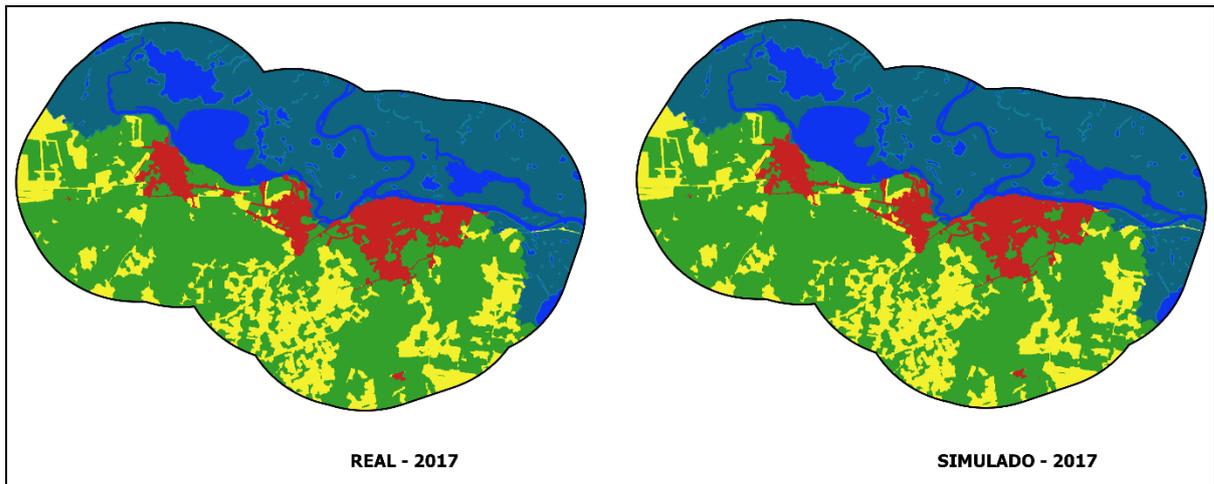
Essas alterações no regime das cheias observadas no mapeamento vão de encontro ao apontamento de Bergier e Resende (2010) conforme demonstrado na Figura 17 com dados do nível fluviométrico do rio Paraguai disponibilizados pelo 6º Distrito Naval da Marinha em Ladário indicam que o ano de 1975 registrou cheias com 4,3 metros e em 1985 foi registrado 6,1 metros. Enquanto os anos de 1994 e 2005 tiveram valores inferiores a 4 metros, com destaque para o ano de 2005 que apresentou uma das piores secas no comparativo com a mesma década.

### 5.3 Modelagem preditiva para o ano de 2060.

#### 5.3.1 Calibração e validação do modelo.

Para melhorar os resultados da aplicação do modelo preditivo é realizada a calibração do modelo através da utilização combinada de variáveis explicativas e restritivas que foi avaliada por meio da comparação entre o mapa simulado para 2017 e o mapa real elaborado com a classificação orientada a objetos. A Figura 18 apresenta os resultados obtidos nestes dois cenários, sendo assim, podemos verificar visualmente a semelhança entre ambos. No entanto, a validação foi complementada com a aferição da estatística *Kappa* da comparação entre os mapas.

**Figura 18** – Comparação entre mapa simulado e real para o ano de 2017.



Na Tabela 19 são apresentados os valores de validação do modelo obtidos com a estatística *Kappa*. Segundo afirmam Landis e Koch (1977) um coeficiente de concordância com valor superior a 0.8 é classificado como excelente. Diante disso, os valores de acurácia apresentados pelo *Kappa Standard* ratificam que este modelo pode ser utilizado para elaborar previsões apoiado pelos resultados apresentados nos trabalhos de Bacani et al. (2016), Silva (2017) e Vick (2019).

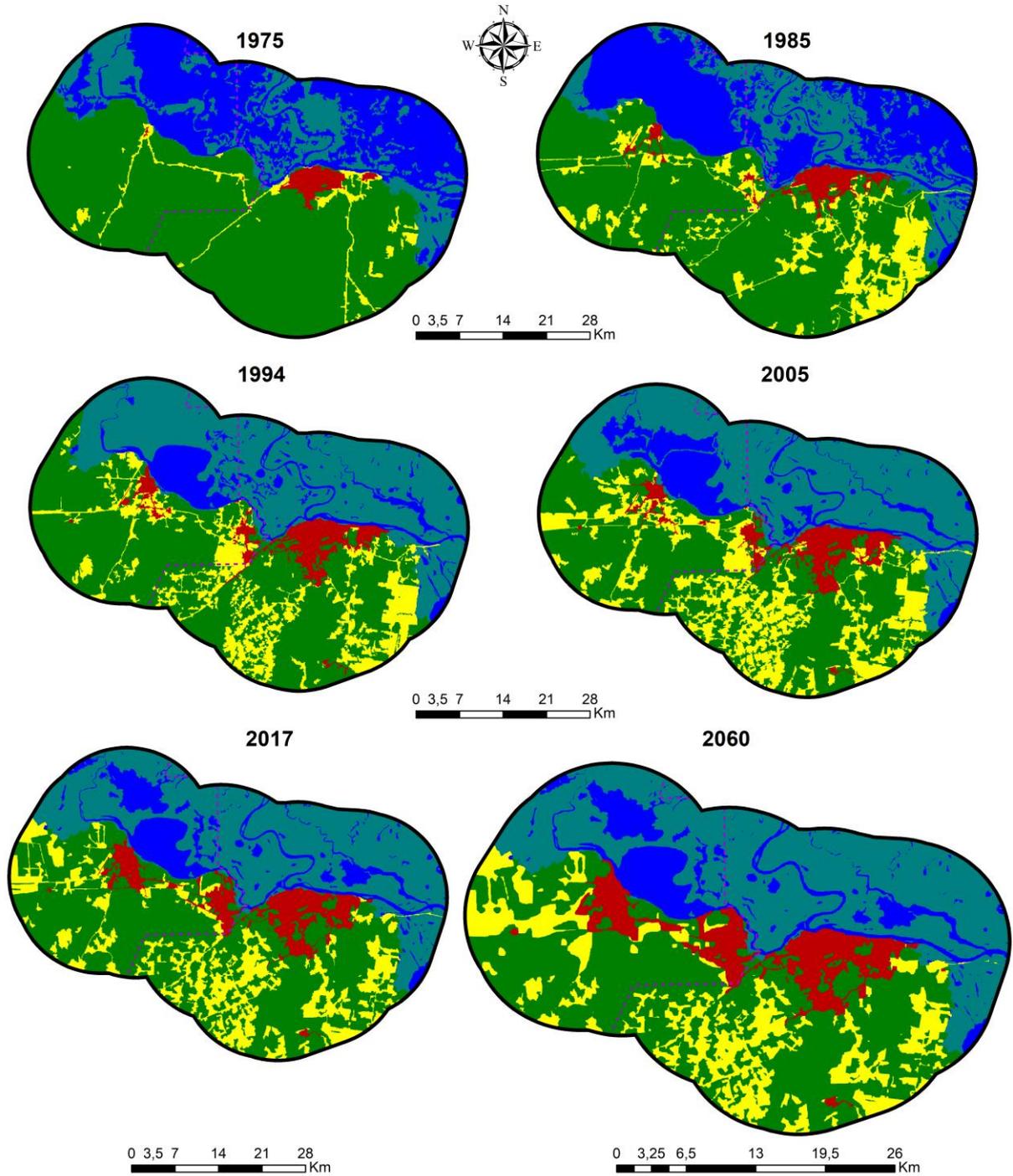
**Tabela 19** – Resultados da estatística *Kappa* entre os mapas real e simulado para 2017.

Parâmetros – Estatística <i>Kappa</i>	Valor
<i>Kstandard</i>	0.8275
<i>Kno</i>	0.8413
<i>KlocationStrata</i>	0.8512

### 5.3.2 Mapeamento preditivo de uso e cobertura da terra para o ano de 2060.

A Figura 19 apresenta o mapa simulado através da aplicação do modelo de CA-Markov com a previsão de alterações para o uso e cobertura da terra para 3 classes temáticas, sendo elas Agropecuária, Área Construída, Vegetação, ressaltando que as demais classes (Corpos Hídricos e Área Úmida) não foram utilizadas para os modelos preditivos, uma vez que, conforme discutido anteriormente são áreas que sofrem interferências sazonais na sua espacialização devido ao regime hídrico do Pantanal e não interferem no objetivo desta pesquisa.

**Figura 19** – Evolução espacial da área de estudo nos anos de 1975, 1985, 1994, 2005, 2017 e 2060.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL  
 Programa de Pós-Graduação em Geografia  
 Fonte: Landsat 2/MSS; Landsat 5/TM; Landsat 8/OLI  
 Sistema de coordenadas: WGS 84 Zona 21S  
 Organização: CABRERO, D. R. O. (2021)

-  Área de estudo
-  Fronteira Brasil-Bolívia
-  Vegetação
-  Agropecuária
-  Área úmida
-  Área construída
-  Corpos hídricos

O resultado da simulação permite avaliar visualmente que a expansão da Área Construída nas cidades bolivianas para o ano de 2060 corrobora a tendência verificada na análise multitemporal entre os anos de 1975 e 2017, com destaque para o período a partir do ano de 2005 em que foi constatado expressivo crescimento da malha urbana nas cidades de Puerto Quijarro e Puerto Suarez.

A Tabela 20 apresenta os resultados de análise da evolução em percentual das classes temáticas de 1975 até o ano simulado de 2060, os resultados foram separados em dois blocos de cidades de acordo com o país destas. Neste sentido, as cidades bolivianas neste modelo tiveram no período entre 2017-2060 expansão percentual da classe Área Construída superior ao projetado para as cidades brasileiras, visto que, o crescimento foi de 2,5% em Puerto Quijarro/Puerto Suarez e de apenas 0,3% em Corumbá/Ladário. Esse resultado confirma a tendência de expansão demonstrada no período de 2005-2017 no qual as cidades bolivianas já apresentaram expressiva expansão da sua Área Construída com crescimento de 2,7% neste intervalo, mas no período projetado a evolução será mais lenta, visto que, foram projetados um intervalo de 43 anos ante um período analisado anteriormente de 12 anos.

A expansão da Área Construída no território boliviano ocorre principalmente com a redução percentual da Vegetação, que durante o período projetado deverá reduzir sua área em 2,4%, enquanto nas cidades brasileiras da fronteira essa expansão indica uma substituição mais equilibrada sobre áreas de Agropecuária e Vegetação.

**Tabela 20** – Evolução percentual das classes temáticas até o ano simulado de 2060.

Cidades	Classe temática	1975	1985	1994	2005	2017	2060	Δ% Total
<b>Puerto Suarez/ Puerto Quijarro</b>	Área Construída	0,1%	1,3%	2,9%	3,2%	5,9%	8,4%	11590%
	Vegetação	56,6%	49,1%	48,5%	42,6%	41,7%	39,3%	-31%
	Agropecuária	2,3%	7,6%	9,4%	13,5%	11,5%	11,4%	400%
<b>Corumbá/ Ladário</b>	Área Construída	2,5%	3,6%	5,4%	5,6%	6,3%	6,8%	170%
	Vegetação	51,5%	41,1%	37,4%	33,3%	35,0%	34,6%	-33%
	Agropecuária	3,2%	13,1%	14,5%	18,4%	16,3%	16,2%	410%

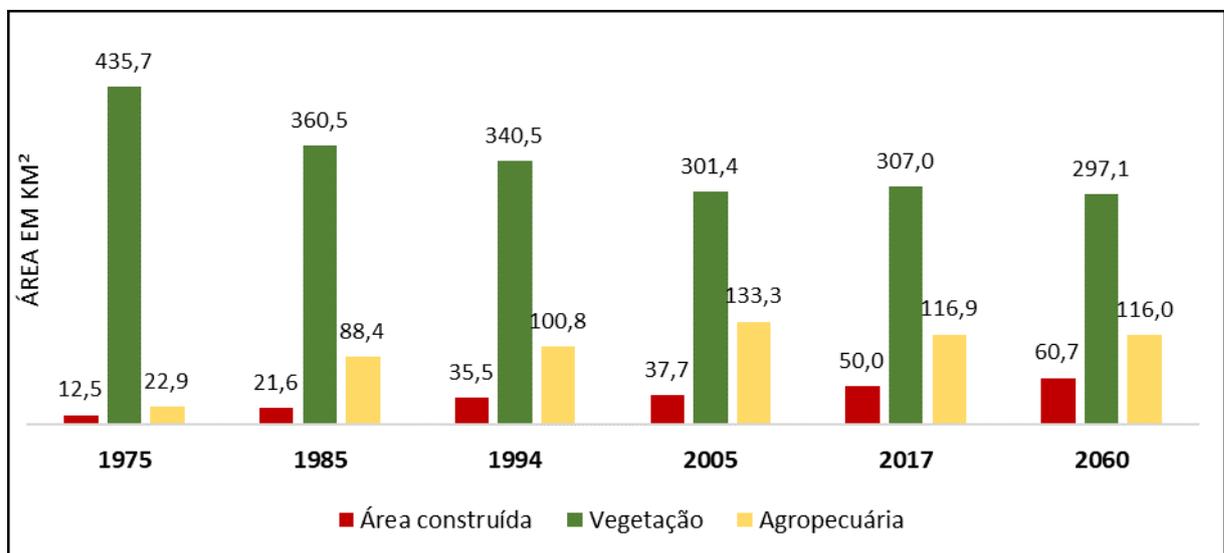
Cabe ainda ressaltar que as cidades de Puerto Suarez e Puerto Quijarro apresentaram durante o período analisado e simulado uma evolução percentual de ocupação pela Área Construída de 11590%, sendo que em 1975 essa classe representa apenas 0,1% e em 2060 irá representar 8,4% da área dos municípios dentro da área de estudo. Por outro lado, as cidades

de Corumbá e Ladário tiveram maior expansão percentual da Agropecuária com aumento de 400% no período 1975-2060, representando apenas 3,2% em 1975 e com projeção de 16,2% em 2060.

A Figura 20 representa os resultados do histórico de alterações na área em extensão por km<sup>2</sup> das classes temáticas utilizadas para o processo de simulação do cenário para 2060. A classe Vegetação após apresentar redução acentuada até o ano 2017 irá seguir a tendência com redução futura de 9,9 km<sup>2</sup>, com destaque para os municípios de Puerto Suarez que tiveram retração de 6,1 km<sup>2</sup> e Puerto Quijarro com 1,7km<sup>2</sup>.

De acordo com os resultados da modelagem preditiva para 2060 a classe de Área Construída apresenta o maior crescimento com acréscimo de 10,7 km<sup>2</sup> atingindo um total de 60,7 km<sup>2</sup> representando cerca de 7,5% do total da área em estudo. Por outro lado, a classe Vegetação teve uma redução de 9,9 km<sup>2</sup> com área total de 297,1 km<sup>2</sup> o que representa 36,5%, e pôr fim a classe Agropecuária se manteve praticamente estável com redução de 0,9 km<sup>2</sup>. Dessa forma, os resultados indicam que o crescimento da Área Construída ocorrerá principalmente sobre as áreas de Vegetação.

**Figura 20** – Área em km<sup>2</sup> das classes de uso da terra e cobertura para o período 1975-2060.



Os resultados observados na Tabela 21 destacam que a evolução da Área Construída nas cidades bolivianas teve expansão acumulada durante o período de 1975-2060, sendo que em Puerto Suarez ocorreu um acréscimo de 7487% e em Puerto Quijarro de 26717%, enquanto as cidades brasileiras tiveram acréscimo em Corumbá de 117% e em Ladário de 907%, por outro lado todas as cidades apresentaram decréscimo da Vegetação durante o período analisado com destaque para Corumbá que teve redução de 36%. Em relação a classe

Agropecuária destaca a expansão de 691% ocorrida em Corumbá, resultado este que teve influência dos programas de reforma agrária que criaram a partir da década de 1980 cerca de 4 assentamentos rurais (INCRA, 2019).

**Tabela 21** – Área em km<sup>2</sup> das classes temáticas para o período de 2017-2060.

Municípios	Classe temática	1975	1985	1994	2005	2017	2060	2017-2060	Δ% Total
Corumbá	Área construída	11,5	15,0	21,4	20,9	23,0	24,8	1,8	117%
	Vegetação	144,5	127,7	104,8	86,8	93,6	92,7	-0,9	-36%
	Agropecuária	5,6	18,3	35,7	53,8	45,2	44,2	-1,0	691%
Ladário	Área construída	0,8	2,3	4,5	6,2	7,5	8,3	0,7	907%
	Vegetação	104,8	71,2	76,2	73,2	76,0	74,8	-1,2	-29%
	Agropecuária	9,8	44,9	34,8	36,1	33,7	34,1	0,4	249%
Puerto Suarez	Área construída	0,2	3,1	5,5	5,7	9,8	14,1	4,3	7487%
	Vegetação	120,8	105,2	109,0	93,4	88,2	82,1	-6,1	-32%
	Agropecuária	5,1	15,5	18,0	29,0	28,5	30,2	1,7	488%
Puerto Quijarro	Área construída	0,1	1,3	4,0	4,9	9,7	13,5	3,8	26717%
	Vegetação	65,6	56,4	51,1	46,7	49,1	47,4	-1,7	-28%
	Agropecuária	2,4	9,6	12,9	15,9	9,6	7,5	-2,1	211%

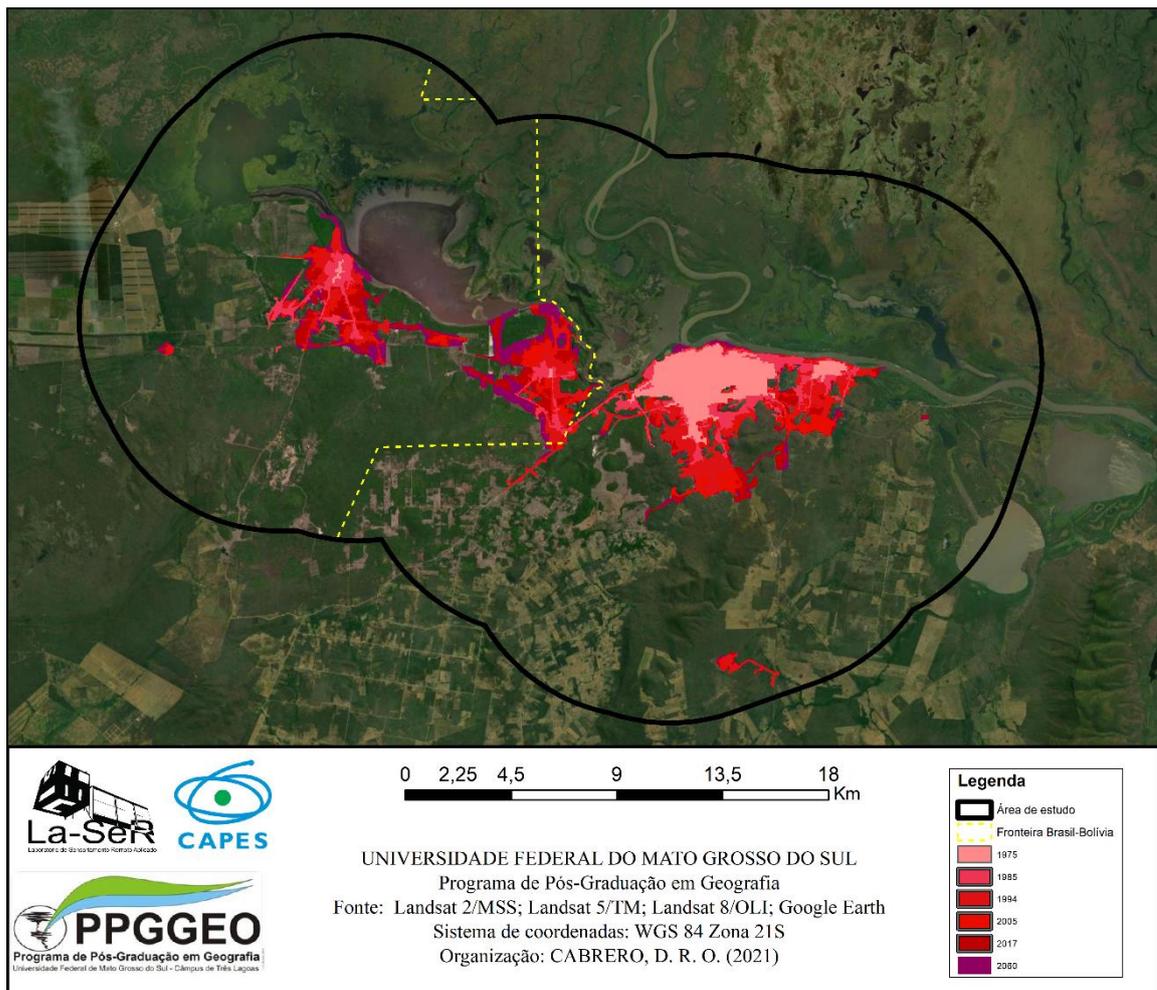
Como afirmou Xavier e Silva (2017) a expansão da malha urbana em Corumbá teve seu desenvolvimento marcado pela ocupação dos vazios urbanos centrais e para o sul, entre as morrarias existentes. Os resultados quantitativos demonstram que as variáveis restritivas (declividade, áreas de proteção permanente, corpos hídricos) tiveram influência na dinâmica da Área Construída nos municípios de Corumbá e Ladário, provavelmente influenciando na desaceleração da expansão desta classe que encontra nessas variáveis fatores que dificultam a expansão da malha urbana, além de outras dimensões sobretudo econômica, ou seja, ausência de interesses imobiliários na cidade - no lançamento de novos loteamentos. Por outro lado, as variáveis explicativas como a proximidade da classe Área Construída das classes Agropecuária e Vegetação, a distância das vias de acesso e a distância dos núcleos urbanos, ajudaram a explicar os resultados que demonstraram uma maior expansão nas cidades de Puerto Suarez e Puerto Quijarro.

As diferenças no processo de expansão da Área Construída entre as cidades podem ser visualizadas na Figura 21 que apresenta através de sobreposição de imagens a evolução desta classe na área de estudo, fato este que confirma a maior crescimento ocorrido nas cidades

bolivianas em comparação as cidades brasileiras. Ainda podemos visualizar que o crescimento desta classe em Puerto Quijarro ocorreu de forma acentuada em direção ao limite da fronteira, fato este que pode ter relação com os constantes fluxos que acontecem diariamente nos dois sentidos da fronteira.

Neste sentido, Xavier e Silva (2017) corroboram com a afirmação anterior ao analisar a dinâmica de crescimento urbano de Puerto Quijarro constatou que entre 2004 e 2015 esta que a ocupação urbana teve como tendência as proximidades do limite da fronteira, e complementa destacando que tal processo parece não ter planejamento urbano controlado, pois as construções tiveram rápido crescimento com edificações sem controles de zoneamento urbano, com ausência de recuos frontais, laterais e ausência de arborização urbana nas calçadas.

**Figura 21** - Comparativo da expansão da Área Construída nos anos de 1975, 1985, 1994, 2005, 2017 e 2060.



Os resultados demonstrados para o território brasileiro da fronteira que indicaram redução no percentual de expansão das Áreas Construídas durante o período analisado, possuem semelhanças com os resultados do estudo de Araya e Cabral (2010) ao analisarem as cidades de Setúbal e Sesimbra, localizadas na região metropolitana de Lisboa, em que no período de 1990-2000 ocorreu uma expansão de 91,11% enquanto para a simulação para o ano de 2006 a expansão foi de apenas 6,34%.

Essa redução da expansão desta classe pode ter como uma das causas as alterações nas legislações para o planejamento urbano, visto que, a partir da criação do Estatuto das Cidades em 2001, ocorreram mudanças significativas em relação ao uso e cobertura da terra nas cidades em decorrência da exigência na elaboração de Plano Diretor para cidades com população superior a 50.000 habitantes. Estas alterações contribuíram para aumentar as exigências para aprovação de novos empreendimentos e também o rigor em relação as restrições para tais projetos (BRASIL, 2001).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região fronteira de Corumbá, localizada na fronteira entre Brasil e Bolívia, formada também pelas cidades de Ladário, Puerto Suarez e Puerto Quijarro, possui histórico de ocupação que teve influência ligada a combinação de diversos fatores sociais, físicos e políticos, dentre eles destaco alguns como a importância da hidrovia, as restrições do relevo, políticas de incentivo a ocupação na fronteira dos governos de ambos países. Diante disso, este trabalho buscou contribuir com uma análise histórica de parte destes fatores e que contribuíssem para o esforço de elaborar o modelo preditivo para avaliar as possibilidades de crescimento da malha urbana.

Os resultados alcançados nesta pesquisa indicam que o crescimento da malha urbana na área de estudo deve desacelerar nos próximos anos, principalmente nas cidades brasileiras. E este processo deve impactar no processo físico de conurbação entre as cidades de Puerto Suarez e Puerto Quijarro, que do ponto de vista da malha urbana ainda apresentam certa distância física entre elas.

A utilização da classificação orientada a objetos (GEOBIA) possibilita um avanço nas aplicações com imagens de satélite, uma vez que, como foi exposto, permite incluir no processo de classificação características como textura, escala, média de valores de pixel, geometria. Estas características abrem a possibilidade de realizar classificações com maiores detalhes e diferenciação de objetos permitindo o aprofundamento do debate sobre os fatores que exercem influência na expansão da malha urbana bem como de outros temas que utilizam a classificação de imagens para a análise científica.

Diante dos resultados alcançados fica exposto a necessidade de pesquisas para compreender a possibilidade de que nas cidades de Corumbá e Ladário ocorra uma intensificação do processo de verticalização das edificações, uma vez que, como constatamos a expansão horizontal encontra dificuldades atualmente devido a fatores restritivos como a legislação, questões ambientais e territoriais.

A elaboração do modelo preditivo para simulação da espacialização das classes no ano de 2060 demonstra que as tendências do passado têm forte interferência na espacialização futura, e isto confirma a importância de políticas de planejamento territorial de longo prazo analisando não somente as formas espaciais do presente, mas considerando a influência do processo histórico das relações entre sociedade e natureza.

A aplicação do método de simulação preditiva com CA-Markov com a lógica AHP se mostrou eficiente como demonstrado pelo índice *Kappa*, no entanto fica exposta a necessidade de aprofundamento na construção desta ferramenta de simulação para considerar nas análises não somente os fatores físicos utilizados nesta pesquisa, mas também buscar a inclusão de dados socioeconômicos que ajudem a explicar o fenômeno de crescimento das áreas urbanas.

Por fim, os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, no entanto, fica aberta a oportunidade de aprofundamento na investigação científica deste tema, uma vez que, a expansão da malha urbana tem cada vez mais importância no planejamento dos municípios para reduzir problemas futuros, e diante deste cenário a modelagem preditiva permite a possibilidade de aplicação para simular diferentes cenários de expansão com diferentes variáveis sociais, econômicas e ambientais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP)**. São José dos Campos: INPE, 2003.
- ALMEIDA M.C., BATTY M., VIEIRA MONTEIRO A.M., CÂMARA G., SOARES-FILHO B.S., CERQUEIRA G.C., et al. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**. 2003 Sep;27 (5):481–509.
- ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Modelos de Dinâmica Urbana: Conceitos, Derivação de Relações, Calibração, Exemplos. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Modelagem Ambiental e Modelos Dinâmicos de Uso e Cobertura do Solo**. Tutorial, XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003.
- ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Modelos de simulação e prognósticos de mudanças de uso do solo urbano: Instrumento para o subsídio de ações e políticas públicas urbanas. **Anais XI Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional**. Salvador, 2005.
- ALVES, C.D.; PEREIRA, M.N.; FLORENZANO, T.Z.; SOUZA, Í. de M. Análise orientada a objeto no mapeamento de áreas urbanas com imagens Landsat. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.15, p.120-141, 2009.
- ARAYA, Y. H.; CABRAL, P. Analysis and Modeling of Urban Land Cover Change in Setúbal and Sesimbra, Portugal. **Remote Sensing**, 2, 2010
- BAATZ, M. SCHAPE, A. **Multiresolution segmentation: na optimization approach for high quality multi-scale image segmentation** (eCognition). 2000.
- BACANI, V. M.; SAKAMOTO, A. Y.; QUÉNOL, H.; VANNIER, C.; CORGNE, S. Markov chains-cellular automata modeling and multicriteria analysis of land cover change in the Lower Nhecolândia subregion of the Brazilian Pantanal wetland. **Journal of Applied Remote Sensing**, Vol. 10, Jan-Mar 2016.
- BANKO, G. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data and methods including remote sensing data in forest inventory. In **International Institute for Applied Systems Analysis**. Luxemburg, 1998
- BATTY, M. **Urban Modelling: Algorithms, Calibrations, Predictions**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 381p
- BATTY, M. Geocomputation using cellular automata. In S. Openshaw, & R. J. Abraham (Eds.), **Geocomputation** (pp. 95–126). London: Taylor & Francis. 2000
- BERGER, M. V. S.; SILVA, M. C. da.; SALDANHA, J. C. S. Análise de vulnerabilidade da RPPN Cafundó. In: MORAES, A. C. de; SANTOS, A. R. dos. (Org.). **Geomática e análise ambiental**. Vitória, ES: EDUFES, p. 32-46, 2007.
- BERGIER, I.; RESENDE, E. K. **Anais 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Cáceres, MT, 16-20 de outubro 2010. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 35 -43

- BENZ, U. C. HOFMANN, P. WILLAUK, G. LINGENFELDER, I. HEYNEN, M. Multi-Resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam. v.58, n. 3/4, p. 239-258, Jan. 2004.
- BLASCHKE, T.; LANG, S.; LORUP, E.; STROBL, J.; ZEIL, P. Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications. *Environ. Inf. Plan. Polit. Public* 2000, 2, 555–570
- BORGES, K; DAVIS, C. Modelagem de dados geográficos. In CÂMARA, G; DAVIS, C; e MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). **Introdução a Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2003. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap4-modelos.pdf>
- BRASIL, LEI Nº 10.257, DE 10 DE JULHO DE 2001.
- BRITES, R. S. **Verificação de exatidão em classificação de imagens digitais orbitais: efeitos de diferentes estratégias de amostragem e avaliação de índices de exatidão**. Tese de Doutorado em Ciência Florestal – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 1996
- CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to remote sensing**. New York, 5ª edição. 2011.
- CHUBEY, M.S.; FRANKLIN, E.; WULDER, M.A. Object – Based Analysis of Ikonos -2 Imagery for Extraction of Forest Inventory Parameters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 72, n.4, pp .383-394, apr. 2006.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote sensing of environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.
- CONTE, C. H. Gênese e dinâmica das aglomerações urbanas de fronteira: Uruguaiana e Paso de Los Libres, Corumbá, Puerto Suárez e Puerto Quijarro, Foz do Iguaçu, Ciudad del Este e Puerto Iguazú. **Geosul**, Florianópolis, v. 32, n. 65, p. 159-181, set/dez. 2017.
- CONTE, C. H. A formação socioespacial de Corumbá e a atividade pecuária *In Caderno de Geografia*, v.28, n.53, 2018
- COSTA, T. C. C. e BRITES, R. S. A influência do tamanho da amostra de referência na exatidão de classificação de imagens de sensoriamento remoto. In **Revista Brasileira de Cartografia** Nº 56/02, 2004
- DELFIN, Documentation. **Developer XD 2.0.4**. Munchen, Germany, 2012.
- DDS – **Decision Support Systems Glossary**, 2006.
- EASTMAN J.R., **Guide to Gis and Image Processing**. Clark University, Worcester, A, USA, 2003.
- EVANS, T.L.; COSTA, M.; TELMER, K.; SILVA, T.S.F. Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian Pantanal. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.3, p.560-575, 2010.

ESRI. **Environmental Systems Research Institute**. ArcGIS Release 10.2 Redlands, CA, 2012.

EXELIS. **Exelis Visual Information Solutions** *software* ENVI 5.3. Bolder, Colorado, 1 Cd Rom. 2014.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

FOODY, G. M. On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. , v. 58, n. 10, p. 1459-1460, 1992.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE. Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica. São Paulo, 2019.

GOMES, D.; VICENTE, L. E.; CARVALHO, S.; VICTORIA, D.; ANDRADE, R. G.; AGNESE, M. L.; SILVA, R. F. B. Avaliação comparativa de correção atmosférica de imagens Landsat utilizando MODTRAN e Dark Object Subtraction. **Simpósio Internacional SELPER**, v. 15, p. 236-245, 2012.

GONG, W.; YUAN, L.; FAN, W.; STOTT, P. Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata – Markov modelling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010 - Características da população e dos domicílios: resultados do universo**. Rio de Janeiro, 2010

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de uso da terra**. Manuais técnicos em Geociências, n. 7. Rio de Janeiro: IBGE, 3ªed. p. 171, 2013.

IBGE, **Arranjos populacionais e concentrações urbanas no Brasil** / IBGE, Coordenação de Geografia. - 2. ed. - Rio de Janeiro. IBGE, 2016. e-Book (PDF). Disponível em <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv99700.pdf>

INCRA, Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. Relatório Geral de Assentamentos – Superintendência Regional Mato Grosso do Sul – SR 16. 2017. Disponível em <http://painel.incra.gov.br/sistemas/index.php>.

INE, Instituto Nacional de Estadística. Censo de Población y Vivienda, 2012.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres. 2. ed. Tradução Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) São Jose do Campos, 2009.

KUKIEL, E. D. G.; COSTA, E. A.; BENEDETTI, A. G. Fronteira Brasil-Bolívia: a construção histórica dos relacionamentos comerciais entre Corumbá e Puerto Quijarro. In: **V Seminário em Estudos Fronteiriços**, 2015, Corumbá. Editora UFMS, 2015. v. 1. p. 1-12.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, p. 159-174, 1977.

LANDSAT MSS 2: imagem de satélite. Virginia: USGS - United States Geological Survey, 1975. Bandas 4, 5, 6 e 7. (Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov>) (Acesso em: 19/06/2018.)

- LANDSAT TM 5: imagem de satélite. Virginia: USGS - United States Geological Survey, 1985. Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. (Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov>) (Acesso em: 19/06/2018.)
- LANDSAT TM 5: imagem de satélite. Virginia: USGS - United States Geological Survey, 1994. Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. (Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov>) (Acesso em: 19/06/2018.)
- LANDSAT TM 5: imagem de satélite. Virginia: USGS - United States Geological Survey, 2005. Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. (Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov>) (Acesso em: 19/06/2018.)
- LANDSAT OLI 8: imagem de satélite. Virginia: USGS - United States Geological Survey, 2017. Bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, e 7. (Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov>) (Acesso em: 19/06/2018.)
- LIU, Y.; LI, M.; MAO, L.; XU, F.; HUANG, S. Review of remotely sensed imagery classification patterns based on object-oriented image analysis. **Chinese Geographical Science**, v. 16, n. 3, p. 282-288, 2006.
- MANETTA, A. **Dinâmica populacional, urbanização e ambiente na região fronteira de Corumbá**. Campinas, SP: [s. n.], 2009.
- MARQUES, A. M. Mobilidade, acesso a saúde e espaço de fronteira: o caso de Corumbá-MS, Puerto Quijarro e Puerto Suarez-Bolívia. Campinas, SP: [s. n.], 2012.
- MANTOVANI, J. R. A. **Uso de geotecnologias para elaboração de um modelo de mapeamento de áreas suscetíveis à inundação e/ou alagamento, na bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Três Lagoas – MS, 2016
- MITSOVA, D.; SHUSTER, W.; WANG, X. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth open space conservation. **Landscape and Urban Planning**, v.99, 2011, p 141 – 153.
- OLIVEIRA, T.C.M.; ESSELIN, P.M. Localizando as condições pretéritas as relações correntes na complexa fronteira Brasil-Bolívia. **Geosul**, Florianópolis, v. 30, n. 60, p 125-163, jul./dez. 2015
- PARRA, M. A. **Regiões Bioclimáticas do Estado de Mato Grosso do Sul**. Rio Claro, 2001. 231 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2001.
- PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. Modelagem dinâmica: Conceitos básicos e exemplos de sistemas In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Modelagem Ambiental e Modelos Dinâmicos de Uso e Cobertura do Solo**. Tutorial, XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003.
- PEREIRA, J. G. **O patrimônio ambiental urbano de Corumbá-MS: identidade e planejamento**. 199 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.
- PEREIRA, J. G.; PEREIRA, L.E. Uso de imagens CBERS 2B e dados SRTM no mapeamento de áreas de vulnerabilidade ambiental na cidade de Corumbá-MS. **Anais XV**

**Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.2628

POLIDORO, M. Reflexões sobre a influência da rodovia br-369 na definição dos padrões de expansão urbana dos municípios no estado do Paraná. **Anais XI ENANPEGE - Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia**, 2011.

RAFFESTIN, C. **Por uma geografia do poder**. Tradução de Maria Cecília França. São Paulo: Ática, 1993.

RIBEIRO, B. M. G.; KUX, H. J. H. Classificação orientada a objeto para mapeamento do uso do solo – métodos de Análise de Expansão Urbana. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 7893-7900.

RIBOCOM, A. E.; CANEPARO, S. C. Metodologia para geração de mapeamentos preditivos utilizando a cadeia de Markov e autômatos celulares – área piloto: perímetro urbano de Paranaguá – Paraná – Brasil. **Anais IV Simpósio Brasileiro de Geomática – SBG2017**. p. 300-308. Presidente Prudente, 24-26 de julho de 2017.

SAATY, T. L., **Método de Análise Hierárquica**. Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1991.

SAATY, T. L. **Decision making with the analytic hierarchy process**. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, 2008

SANTOS, S. I. P. dos. **Cenários de Uso e Ocupação do Solo até 2040 em Portugal Continental**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Sistemas de Informação Geográfica) – Universidade Nova de Lisboa. Instituto Superior de Estatística e Gestão da Informação, 85 f, 2014.

SANTOS, A. E.; PEIXINHO, D. M. Processo de conurbação: elementos espaciais do fenômeno em área não metropolitana. **Estudos Geográficos**, Rio Claro, 13(1): 35-52, jan./jun. 2015.

SIDDIQUI, A.; SIDDIQUI, A.; MAITHANI, S.; JHA, A. K.; KUMAR, P.; SRIVASTAV, S. K. Urban growth dynamics of an Indian metropolitan using CA Markov and Logistic Regression. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences** Vol. 21, p. 229-236, 2017.

SILVA, L. F. **Deteção de mudanças e modelagem preditiva do uso e cobertura da terra do Pantanal de Aquidauana, MS**. Dissertação de Mestrado em Geografia – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campus de Aquidauana, 97 f, 2017.

SILVA, L. P. B. da; MACHADO, L. O.; RIBEIRO, L. P., Fronteira Brasil-Bolívia: Interações e Características do Espaço Fronteiriço. **Unbral Fronteiras**, 2009 acesso em 18/04/2018, <http://unbral.nuvem.ufrgs.br/base/items/show/9376>.

TESSARI, L. M. **Processo de expansão urbana e conurbação em uma aglomeração urbana não-metropolitana no interior paulista**. Dissertação de Mestrado em Geografia – Universidade Estadual Paulista - Campus de Rio Claro. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 163 f, 2009.

TRIMBLE, Geospatial. Software **eCognition Developer 8.9**. Sunnyvale, CA, 2013.

TORRENS, P. M. Automata-based models of urban systems. In **Advanced Spatial Analysis**, P. Longley & M. Batty (Eds.), Redlands, ESRI Press, pp. 61-79, 2003.

VICK, E. P. **Análise multitemporal e modelagem preditiva das mudanças no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Pântano – MS**. Dissertação de Mestrado em Geografia – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campus de Três Lagoas, 135 f, 2019.

VILLAÇA, F. **O espaço intraurbano no Brasil**. 2. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

USGS, United States Geological Survey. **Landsat Collection 1** Level 1 Product Definition. Version 1, 32 f. 2017. Disponível em [https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1656\\_Landsat\\_Level-1\\_Product\\_Collection\\_Definition.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1656_Landsat_Level-1_Product_Collection_Definition.pdf)

XAVIER, L. M. M.; SILVA, B. L. de P. Análise histórica do crescimento urbano da cidade de Corumbá/BR na fronteira Brasil/Bolívia. **Revista GeoPantanal**. UFMS/AGB. Corumbá/MS. N. Especial.pg 265-276. 2017

WATTS, J. D.; LAWRENCE, R. L.; MILLER, P. R.; MONTAGNE, C. Monitoring of cropland practices for carbon sequestration purposes in north central Montana by Landsat remote sensing. **Remote Sensing of Environment**. p. 113, 1843-1852. 2009.