

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

DARWIN SNEIDER TORRES DIAZ

**ANÁLISE TEMPORAL DOS PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO A
PARTIR DE IMAGENS MODIS NO VALE DE VILLA DE LEYVA -
BOYACÁ - COLÔMBIA**

PORTO ALEGRE - RIO GRANDE DO SUL

2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto para obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Aluno: Darwin Sneider Torres Díaz

Orientador: Prof. Dr. Laurindo Antônio Guasselli

PORTO ALEGRE - RIO GRANDE DO SUL

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

DARWIN SNEIDER TORRES DIAZ

ANÁLISE TEMPORAL DOS PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO A PARTIR DE IMAGENS MODIS NO VALE DE VILLA DE LEYVA - BOYACÁ - COLÔMBIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto para obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Aluno: Darwin Sneider Torres Díaz

Orientador: Prof. Dr. Laurindo Antônio Guasselli

Aprovada em: 31/10/2017

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cláudio Wilson Mendes Júnior
(Departamento de Geodésia/IGEO/Docente PPGSR/UFRGS)

Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer
(Departamento de Geografia/IGEO/Docente PPGSR/UFRGS)

Prof. Dr. Roberto Verdum
(Departamento de Geografia/POSGEO/UFRGS)

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho principalmente a minha família,
minha mãe , ao meu pai, e ao meu irmão pelo apoio
em todas as circunstancias que se apresentaram.*

*Também a David Montoya pelo apoio incondicional
e por ter compartilhado comigo esta experiência.*

EPÍGRAFE

*Hunza, serás estéril; nunca más flores ni árboles
verán tu suelo; tu tierra será desnuda y barrancosa
y no tendrás más compañeros que el viento y el frío.*

Maldición a Tunja por el Zaque Hunzahua
Luego de la Colonización española.

*Hunza, você ficará estéril; nunca mais as flores nem as árvores
Vai ver o seu solo, a sua terra será nua e pedregosa
e você não vai ter mais companheiros que o vento e o frio.*

Maldição a Tunja pelo Zaque (Chefe) Hunzahua
Após da colonização espanhola.

(Hunza era o nome antigo da província
Onde agora fica a zona de Villa de Leyva)

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS por me permitir ser aluno dessa instituição, uma das melhores do Brasil e da América Latina. Também agradeço ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – CEP SRM pela oportunidade de desenvolver este trabalho e fornecer as condições favoráveis para fazer ele realidade.

Ao todo o corpo docente do programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – PPGSR pela aprendizagem nesta experiência, especialmente ao meu orientador, o professor Laurindo Guasselli por todo o seu apoio, conhecimento, parceria, paciência e grande profissionalismo para me orientar no desenvolvimento deste trabalho, meu respeito e admiração para ele.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES por financiar a bolsa de estudo a qual foi fundamental para a realização deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento e Análise Ambiental - LAGAM por compartilhar maravilhosas experiências comigo.

Ao corpo administrativo e as secretarias do CEP SRM, Magdalena e Mônica pela ajuda fornecida todo o tempo.

Ao *Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental – CIGA* da Universidade Nacional Autónoma de México pela mobilidade acadêmica e as experiências que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

As minhas amigas e professoras colombianas, Beatriz Alzate e Edith Gonzalez pelo seu conhecimento fornecido em estas temáticas desenvolvidas neste trabalho.

A minha família pelo apoio permanente estando mesmo a distância, sempre estiveram comigo no desenvolvimento deste processo. Ao David Montoya pela companhia em todo este tempo, pela sua grande ajuda para desenvolver este trabalho e por compartilhar comigo esta grata experiência.

À família Dalla Rosa e a Tatiana Reyes pela sua amizade, companhia e por me acolher como um integrante mais da família, compartilhar e curtir momentos agradáveis fazendo muito grata a minha experiência no Brasil.

RESUMO

O processo da desertificação é um problema de importância mundial, pois reduz a produtividade das terras como também a função ecológica dos ecossistemas onde acontece este processo. A desertificação é o resultado dos processos de degradação ambiental nas zonas áridas, semiáridas e sub-úmidas secas produto de fatores biofísicos como a variação climática e também das atividades humanas. A região do Vale de Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia, tem paisagens em processo de transformação por desertificação porque esta localizada num local seco, pouca precipitação e com solos frágeis. Após da conquista espanhola, esta área teve a maior transformação ambiental iniciando com a sobre exploração dos recursos naturais como as florestas, os solos e os corpos de água, acelerando ainda mais este processo de degradação. Tendo em conta esse contexto, o método de análise das dinâmicas da zona para identificar padrões e processos de desertificação a partir de séries temporais de índices de vegetação, como o NDVI e EVI, foram empregadas técnicas de análise espacial, a traves de Sistemas de Informação Geográfica SIG e ferramentas de Sensoriamento Remoto. Foi feita aquisição das imagens de Índices de vegetação NDVI e EVI do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, entre os anos 2001 e 2016. As imagens foram filtradas como o algoritmo Savitzky-Golay para diminuir os erros da informação original, como também os vazios. As series temporais foram analisadas com o intuito de identificar as áreas e os períodos em que ocorreram as mudanças ambientais mais significativas na região com relação à camada vetorial de erosão, elaborada a uma escala 1:100.000. Posteriormente, foi feito uma análise de tendência pelo algoritmo Mann-Kendall para identificar tendências negativas dos índices de vegetação, e fazer uma sobreposição com os índices do último ano, obtendo assim as áreas com maior risco de sofrer processos de degradação ambiental e que podem gerar desertificação. Para validar esses procedimentos, foi feita uma comparação visual com o NDVI do programa Landsat 8 no mesmo período, identificando padrões de distribuição da vegetação muito semelhantes, embora a resolução espacial dos dois tipos de imagens seja muito diferente. Entre os principais resultados, foi possível identificar que as áreas em risco de sofrer processos de desertificação não estão associadas nem obedecem a um processo constante desde sua origem como foi pensado inicialmente, mas as atividades atuais de agricultura não sustentável são as que causam esses processos de degradação. Na atualidade, este processo acontece de forma mais pontual e esta associado a fatores antrópicos, principalmente pelas práticas agrícolas não sustentáveis na região, principalmente pelo incremento dos cultivos de tomate sob estufa. Também existem áreas com tendência a recuperação da vegetação por fatores naturais, por processos de crescimento de gramíneas, como também por processos artificiais, semeadura de arvores e gramado, com o fim de adequar a paisagem nas áreas de expansão urbana que limitam com o “deserto”, gerando novas dinâmicas de ocupação da região que posteriormente precisam ser estudadas.

Palavras-chaves: Desertificação, Mann-Kendall, Sensoriamento Remoto, NDVI, EVI, MODIS.

ABSTRACT

Desertification process represents a problem of global importance, due to the reduction not only of the productivity of farmlands, but also of the ecological function of ecosystems where this process takes place. Desertification is the result of processes of environmental degradation in the arid, semi-arid and dry sub-humid areas, resulting from biophysical factors such as climatic variation and from human activities, as well. The valley of Villa de Leyva, Boyacá, Colombia, has landscapes in transformation process by desertification because it is located in a dry place, with little precipitation and with fragile soils. After the Spanish conquest, this area had the greatest environmental transformation, starting with overexploitation of natural resources such as forests, soils and bodies of water; all these factors accelerated the process of degradation. Taking into account this context, it is necessary to establish a method of analysis of the dynamics of the zone, in order to identify patterns and processes of desertification through temporal series of vegetation indexes, such as NDVI and EVI, using spatial analysis techniques, through of GIS Geographic Information Systems and Remote Sensing tools. The first step was the acquisition of the vegetation indices NDVI and EVI of the product the images of NDVI and EVI vegetation indices of the MODIS product MOD13Q1 between 2001 and 2016 were acquired. The images were filtered as the Savitzky-Golay algorithm to reduce the errors of the original information as well as the voids. The time series were analyzed in order to identify the areas and periods in which the most significant environmental changes occurred in the region in relation to the vector layer of erosion, elaborated at a scale 1:100.000. Afterwards, a trend analysis was performed by the Mann-Kendall algorithm to identify negative trends of vegetation indexes, and to overlap with the indices of the last year, thus obtaining the areas with the highest risk of environmental degradation processes that can generate desertification. To validate these procedures, a visual comparison was made with the NDVI of the Landsat 8 program in the same period, identifying vegetation distribution patterns very similar, although the spatial resolution of the two types of images is very different. Among the main results, it was possible to identify that the areas at risk of suffering desertification processes are neither associated nor obeyed a constant process since its origin as initially thought, but the current activities of non sustainable agriculture are those that cause these processes of degradation. Nowadays, this process happens in a more punctual way and is associated to anthropic factors, mainly by the unsustainable agricultural practices in the region, mainly by the increase of tomato crops under greenhouse. There are also areas where the vegetation recovers by natural factors, by processes of grass growth, as well as artificial processes, planting trees and pastures, with the purpose of adjusting the landscape in areas of urban expansion that limit with the "desert", generating new dynamics of occupation in the region that need to be studied further.

Key-words: desertification, Mann-Kendall, remote sensing, NDVI, EVI, MODIS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área do vale de Villa de Leyva, departamento de Boyacá, Colômbia.	23
Figura 2: Localização da área de estudo. Imagem Landsat 8, em composição colorida falsa- cor 543-RGB, no centro da área situa-se o “deserto de La Candelária”, Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia.	24
Figura 3: Mapa Geológico da área de estudo. Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia.....	26
Figura 4: Montanhas estruturais erosionais entre os municípios de Villa de Leyva e Sutamarchán.....	28
Figura 5: Mapa Geomorfológico da área de estudo. Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia.....	29
Figura 6: Mapa de Solos da área de estudo. Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia.	31
Figura 7: Precipitação anual média em mm/ano, município de Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia.....	37
Figura 8: Temperatura média anual em °C, Município de Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia..	38
Figura 9: Dados de precipitação e a temperatura média anual, Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia.....	38
Figura 10: Aqueduto construído para conduzir a água do moinho na região.	40
Figura 11: Açude para armazenamento da água do moinho.....	41
Figura 12: Sistema de condução da água até a estrutura principal do moinho.....	41
Figura 13: Moinho de água, ponto de coleta da farinha moída.....	42

Figura 14: Usina de processamento de argilas no Vale de Villa de Leyva.....	43
Figura 15: Ponto de comercialização das cerâmicas produzidas na região.	43
Figura 16: Imagem Landsat ETM, composição colorida falsa RGB-453, sobreposta a uma imagem SRTM em 3D	64
Figura 17: Fluxograma dos procedimentos metodológicos	65
Figura 18: Extração da Imagem SRTM e mapa altimétrico da bacia hidrográfica.	67
Figura 19: Panorâmica do Vale de Villa de Leyva de acordo com o perfil topográfico.....	68
Figura 20: Perfil topográfico do Vale de Villa de Leyva.	68
Figura 21: Mapa de erosão da área de estudo.....	73
Figura 22: Mapa de salinização na área de estudo.	75
Figura 23: Zona com processos de salinização no vale de Villa de Leyva	76
Figura 24: Mapa de tendências à desertificação na área de estudo.....	77
Figura 25: Imagem de NDVI – MODIS, 12/2016 e dos limites das áreas de erosão.....	80
Figura 26: Imagem de NDVI – Landsat 8, 12/2016 e dos limites das áreas de erosão	81
Figura 27: Áreas selecionadas para as análises dos perfis com base nas estatísticas zonais. .	83
Figura 28: Comparação de um perfil de NDVI do MODIS a partir das imagens originais (linha preta) e com as imagens filtradas (linha vermelha) para as 23 imagens do ano 2016 em uma área com erosão.	84
Figura 29: Diagrama de caixa para os perfis de NDVI para área_1 (verde), área_2 (laranja), área_3 (vermelho).	85

Figura 30: Diagrama de caixa para os perfis de EVI para área_1 (verde), área_2 (laranja), área_3 (vermelho).	85
Figura 31: Perfis temporais do NDVI do MODIS MOD13Q1 para maio e dezembro do período 2001-2016 para área_1 (linha verde),área_2 (linha laranja),área_3 (linha vermelha). (a) NDVI de maio; (b) NDVI de dezembro.	86
Figura 32: Perfis temporais do EVI do MODIS MOD13Q1 para maio e dezembro do período 2001-2016 para área_1 (linha verde),área_2 (linha laranja),área_3 (linha vermelha). (a) EVI de maio; (b) EVI de dezembro.	86
Figura 33: Área com cultivo de cebola no vale de Villa de Leyva.....	88
Figura 34: Comportamento dos índices de vegetação NDVI: (a) Perfil NDVI 2005; (b) Perfil NDVI 2010.....	88
Figura 35: Vegetação encontrada em áreas com processos de desertificação no vale de Villa de Leyva. (1) <i>Pennisetum</i> , (2) <i>Melinis</i> e (3) <i>Calamagrostis</i>	89
Figura 36: Áreas com tendência a aumentar a vegetação nas zonas de expansão urbana e próximas a áreas com desertificação.	90
Figura 37: Tendências de mudança do NDVI e EVI pelo método Mann-Kendall: (a) NDVI de maio; (b) NDVI de dezembro; (c) EVI de maio; (d) EVI de dezembro.....	91
Figura 38: Área com processos de erosão e com tendência a desertificação.	92
Figura 39: Quedas das freqüências do NDVI como resultado da tendência a diminuição em áreas com processo de erosão modelo Mann-Kendall: (a) Perfil NDVI de maio; (b) Perfil NDVI de dezembro.....	93

Figura 40: Áreas com processos de desertificação (vermelho) por Kendall negativo do NDVI de maio e o NDVI de maio 2016.....	95
Figura 41: Áreas com processos de desertificação (vermelho) por Kendall negativo do NDVI de dezembro e o NDVI de dezembro 2016.	95
Figura 42: Áreas com processos de desertificação (vermelho) por Kendall negativo do EVI de maio e o EVI de maio 2016.....	96
Figura 43: Áreas com processos de desertificação (vermelho) por Kendall negativo do EVI de dezembro e o EVI de dezembro 2016.	96
Figura 44: Calculo de porcentagem dos pixels identificados em processos de desertificação segundo o grau de erosão.	97
Figura 45: Fotografia de um ecossistema de “páramo”	98
Figura 46: Mapa das áreas com ecossistema de “páramo” no Santuário de flora e fauna “Iguaque”	99
Figura 47: Mapa de localização dos pontos amostrais	101
Figura 48: Estufa para cultivo de tomate e açude para armazenamento de água para o cultivo.	102
Figura 49: Área com início da presença de estufas para cultivo de tomate – ano 2006 Ponto 1.	103
Figura 50: Área com aumento de estufas para cultivo de tomate – ano 2016 Ponto 1.	103
Figura 51: Áreas sem tendências a desertificação no Vale de Villa de Leyva	104
Figura 52: Zonas de extração de areias para construção (Ponto 4).	105

Figura 53: Mapa de processos de degradação por desertificação segundo o grau de erosão.

..... 106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de unidades cronoestratigráficas da área de estudo.....	27
Tabela 2: Unidades e tipos de solos da área de estudo	34
Tabela 3: Sistemas e equivalências na classificação dos solos.....	35
Tabela 4: Produtos dos índices de vegetação do sensor MODIS (MOD13)	58
Tabela 5: Tipos, graus e áreas com erosão na área de estudo.	74
Tabela 6: Tipos de tendência à desertificação com as respectivas áreas da zona de estudo.	78
Tabela 7: Porcentagem de área com tendência positiva e negativa para o NDVI e EVI de maio e dezembro.....	92
Tabela 8: Porcentagem de área total em processo de desertificação por tipo de índice e mês	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DANE:	Departamento Administrativo Nacional de Estatística
DEM:	Modelo Digital de Elevação
EOS:	<i>Earth Observing Systems</i>
ETM:	Mapeador Temático Melhorado
EVI:	Índice de Vegetação Melhorado
HDF:	Formato de Dados Hierárquicos
IDEAM:	Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais
IGAC:	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IV:	Índices de Vegetação
MADR:	Ministério de Agricultura e Desenvolvimento Rural
MAVDT:	Ministério do Meio Ambiente, Habitação e Desenvolvimento Territorial
MODIS:	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA:	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
NDVI:	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
PAN:	Plano Nacional de Ação de luta contra a desertificação e a seca
PNUD:	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RCEN:	Rotação Controlada por Eixo de não Mudança
SRTM:	Missão Topográfica Radar Shuttle
TGSI:	Índice de Tamanho do Grão do Topsoil
TM:	Mapeador Temático
UNCCD:	Convenção das Nações Unidas de Luta Contra a Desertificação
UNESCO:	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura.
USGS:	Serviço Geológico dos Estados Unidos

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Justificativa	20
1.2 Objetivos da pesquisa.....	21
1.2.1 Objetivo Geral.....	21
1.2.2 Objetivos Específicos	22
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	23
2.1 Componente Biofísico da área de estudo	25
2.1.1 Geologia.....	25
2.1.2 Geomorfologia.....	28
2.1.3 Pedologia	29
2.1.4 Aspectos climáticos	36
2.2 Contexto histórico da área de estudo	39
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	45
3.1 Processos de desertificação, definição e aproximações	45
3.1.1 Processos de desertificação gerados por erosão e salinização.....	48
3.2 Tecnologias da Informação Geográfica	49
3.2.1 Aplicações em estudos sobre processos de desertificação	49
3.2.2 Sensor MODIS.....	54
3.2.2.1 Níveis de Processamento	55
3.2.2.2 Produto MOD13	56
3.2.3 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI).....	58
4. MATERIAIS E MÉTODOS	62
4.1 Materiais.....	62

4.1.1 Dados de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI).....	63
4.1.2 Imagem SRTM ou Modelo Digital de Elevação (DEM)	63
4.1.3 Camadas vetoriais: Erosão, Salinização, Tendências a Desertificação.....	64
4.2 Métodos.....	65
4.2.1 Geração do limite da bacia hidrográfica do Vale de Villa de Leyva	66
4.2.2 Geração de perfis dos índices de vegetação das imagens MODIS.....	69
4.2.3 Áreas afetadas por processos de erosão, salinização e tendência à desertificação	69
4.2.4 Operações estatísticas zonais.....	70
4.2.5 Geração do mapa de tendências e mudanças do NDVI e EVI	70
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1 Análises das camadas vetoriais de erosão, salinização e tendência à desertificação ...	72
5.2 Comparação dos produtos NDVI dos Sensores MODIS e OLI do Landsat 8	78
5.3 Identificação e definição de regiões para o cálculo de estatísticas zonais para a geração de perfis comparativos do NDVI e EVI do Sensor MODIS e diagramas de caixa (“Box-plot”) com base na camada digital de erosão	82
5.4 Preprocessamento e geração de perfis de índices de vegetação	83
5.5 Identificação das áreas com processos de degradação ambiental e a sua evolução até a atualidade	100
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	107
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	109
ANEXOS	118

1. INTRODUÇÃO

As áreas desertificadas do planeta surgiram por inúmeros fatores e processos que envolvem a dimensão biofísica e socioeconômica em várias séries de tempo, gerando mudanças no território que se caracterizaram sob diferentes conceitos desenvolvidos por diversos autores e instituições ao redor do mundo (IGAC; *et al.*, 2010b; UNCCD, 1994; UNESCO, 2010).

Por esta razão, não há um consenso na definição dos conceitos e agentes que operam no espaço geográfico para categorizá-lo como em processo de desertificação criando definições "locais" nos lugares onde o fenômeno ocorre. Isto torna mais difícil a adoção de um conceito unificado que defina o que é a desertificação, bem como a adoção de políticas e de esquemas de planejamento do uso do solo que apóiam a luta contra este processo.

Para o desenvolvimento deste trabalho, a definição adotada para caracterizar a desertificação vem da Convenção de Nações Unidas de luta contra a desertificação e consiste no processo de degradação das terras áridas, semi-áridas e áreas sub-úmidas secas. O fenômeno é causado principalmente por variações climáticas e atividades humanas como agricultura, sobrepastoreio, desmatamento e a falta de irrigação. É interessante notar que a desertificação não se refere à expansão dos desertos já existentes. Este fenômeno ocorre porque os ecossistemas das terras áridas, que cobrem um terço do total do planeta Terra, são extremamente vulneráveis à exploração excessiva e uso inadequado da terra (UNCCD, 1994).

As paisagens atuais na área do Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia, são o produto de múltiplas interações entre o ambiente biofísico como a localização da área em um local seco, com pouca precipitação e de fragilidade dos solos. O efeito antropogênico na área tem sido acentuado desde o período da conquista espanhola o que originou processos de sobreutilização do solo para o cultivo de trigo e cevada, e para a extração de argila para cerâmica. Essas dinâmicas aceleraram os processos de degradação do solo causando erosão e surgimento de voçorocas refletido na perda de solo por meio da configuração da paisagem do "deserto" através do tempo (MOLANO, 1990).

Dado o aumento de áreas degradadas ao longo do tempo, é importante estabelecer mecanismos de acompanhamento para o controle dos impactos ambientais e processos de degradação da terra. Estas dinâmicas geram fenômenos de deslocamento da população rural em direção aos centros urbanos em condições de desvantagem econômica e social para as populações localizadas em áreas com processos de degradação ambiental constante (ALZATE, 2008).

Por outro lado, os diferentes ecossistemas suscetíveis de desertificação também podem ser degradados até ser transformados devido a estes processos, como fatores de ocupação e transformação do território de forma intensiva, avançam de maneira que as áreas degradadas aumentam gradualmente. O que torna difícil a conservação, desenvolvimento e recuperação dos ecossistemas originais e que estão associados com este tipo de ambientes em processo de degradação ambiental (UNESCO, 2010).

A partir das questões descritas se estabelece a necessidade de abordar a temática com algumas contribuições teórico-metodológicas tais como processos de desertificação, através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e analisar estes processos de transformação ambiental em séries temporais. A pergunta que motiva a proposta de pesquisa com base nas abordagens expostas se relaciona a "como os processos de desertificação tem evoluído nas escalas espacial e temporal na área do Vale de Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia"?

Por muito tempo os processos de degradação do solo tem sido um tópico de estudos e pesquisas, especialmente sobre o tema das terras áridas e semi-áridas. Neste sentido, considerando a diversidade de definições sobre a desertificação e a Convenção de combate à desertificação, este é um processo que consiste na degradação da terra em zonas áridas, semi-áridas e sub-úmidas secas resultantes de vários fatores, incluindo variações climáticas e atividades humanas (HIRCHE *et al.*, 2011).

Para o desenvolvimento de estudos sobre processos de desertificação é necessária a coleta de informação geográfica que fornecerá elementos para a análise desses processos no território tanto em características espaciais como temporais. Neste caso, a aplicação de técnicas de análise e interpretação de imagens de Sensoriamento Remoto cumpre a função de fornecer informações adequadas nos tópicos de espacialidade e temporalidade. Satélites

com sensores multiespectrais oferecem grandes possibilidades para a aquisição de informações, pois permitem extrair informações espaço-temporais nos estudos de desertificação (WANG, H. *et al.*, 2015).

O estudo dos processos de desertificação a partir de imagens de satélite começou na década dos anos 70's. O principal indicador desenvolvido para o diagnóstico da desertificação foram os índices de vegetação para assim identificar processos de degradação do solo. Com o avanço tecnológico e a disponibilidade de diferentes fontes de informação sobre o uso e cobertura da terra, a investigação sobre a temática da desertificação tem produzido mais conhecimento a partir de novos sensores a bordo de satélites que fornecem muita variedade de informação. Neste sentido, as imagens do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) e os índices de vegetação constituem uma ferramenta adequada para o desenvolvimento de indicadores do processo de desertificação em grandes áreas com baixa cobertura vegetal (ZHANG *et al.*, 2010).

1.1 Justificativa

O Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais da Colômbia - IDEAM, definiu seis áreas prioritárias para promover ações que permitam a gestão sustentável dos ecossistemas das terras secas na Colômbia, bem como a implementação de medidas práticas para prevenir e parar os processos de degradação e contribuir para o desenvolvimento sustentável destas regiões.

Entretanto, é necessário desenvolver mais pesquisas sobre a desertificação com avanços na geração de novos conhecimentos que contribuam para o desenvolvimento de estratégias de conservação e mitigação, de modo a contribuir no desenvolvimento de planos de uso da terra, levando em conta as necessidades da população que vive nessas áreas.

Os processos de desertificação geralmente trazem consigo problemas como a marginalização social e a pobreza, causando migrações e outros efeitos sobre a população que vive nestas áreas. Assim, é necessário modificar a abordagem nos estudos da desertificação, porque eles foram historicamente dominados por questões puramente biofísicas (PÉREZ, 2013).

Portanto, na análise dos processos da dinâmica ambiental é necessário definir unidades de análise que concentre os elementos que compõem o ambiente físico e os processos socioeconômicos que convergem no espaço geográfico, com o fim de planejar o território para lograr um desenvolvimento regional sustentável, pois os atuais sistemas produtivos geram processos de degradação ambiental em distintas regiões (MOSENA, 2008).

As imagens de satélite são representações do espaço geográfico, produto da dinâmica de apropriação e transformação do território a partir das relações entre sociedade e natureza em diferentes escalas espaciais e temporais, ao mesmo tempo, são fontes de informações temáticas sobre a dinâmica das mudanças do uso e cobertura do solo, permitindo a análise e observação da extensão e a prestação de serviços dos ecossistemas (FENG *et al.*, 2010).

Este projeto centra-se na análise dos indicadores espaciais a partir de Índices de Vegetação visando o diagnóstico sobre as áreas com processos de desertificação, para contribuir com o estabelecimento de medidas para o planejamento e ordenamento do território nas regiões afetadas, levando a mitigar os impactos deste fenômeno.

1.2 Objetivos da pesquisa

Este trabalho visa promover ações no futuro para a gestão sustentável dos ecossistemas das terras secas, bem como a implementação de medidas práticas para reverter ou deter os processos de degradação e contribuir para o desenvolvimento sustentável das seis áreas que foram definidas como prioritárias para este tipo de estudos na Colômbia incluindo o planalto Cundi-boyacense, região onde se situa a área de estudo deste trabalho, o Vale de Villa de Leyva.

1.2.1 Objetivo Geral

Identificar padrões e processos de degradação ambiental em relação à desertificação na área do Vale de Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia, utilizando técnicas de análise espacial a partir de séries temporais de imagens de Sensoriamento Remoto.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Analisar as séries temporais dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI, e Índice de Vegetação Melhorado - EVI por meio de imagens de satélite do sensor MODIS, na região do Vale de Villa de Leyva;
2. Identificar as áreas e os períodos em que ocorreram os processos de transformação ambientais mais significativos relacionados à desertificação;
3. Relacionar os dados dos Índices de Vegetação NDVI e EVI e de áreas com processos de degradação ambiental por erosão, salinização e tendências à desertificação;
4. Analisar os processos de mudança e de presença-ausência de vegetação a partir dos Índices de Vegetação - NDVI e EVI como indicadores dos processos de desertificação.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

O Vale de Villa de Leyva encontra-se localizado no departamento de Boyacá, na Cordilheira leste dos Andes, na República de Colômbia, Figura 1.

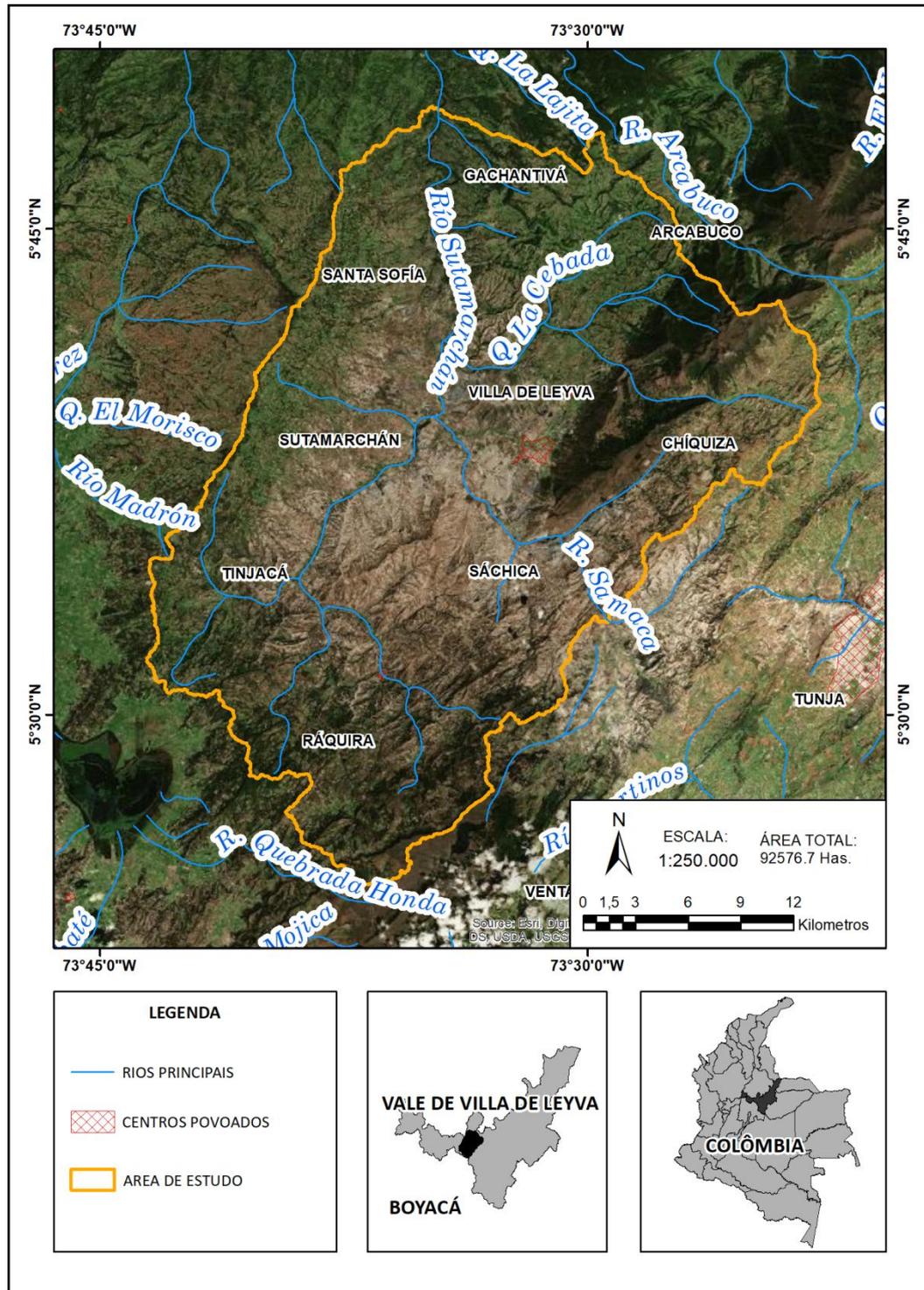


Figura 1: Localização da área do vale de Villa de Leyva, departamento de Boyacá, Colômbia.

A área de estudo, o “deserto de La Candelária”, Figura 2, localiza-se entre as coordenadas geográficas aproximadas: 5° 28' e 5° 44' de latitude norte e entre 73° 26' e 73° 40' de longitude oeste. Situa-se nas bacias hidrográficas dos rios Sutamarchán, Cane e Samacá, no centro da Colômbia, com altitudes entre 2.100 e 2.800 m. A área foi escolhida como objeto de estudo sendo representativa nos processos de desertificação das terras altas andinas. Esta área ocupa o antigo leito de mar do período Cretáceo que desapareceu pelo processo de levantamento da Cordilheira leste dos Andes no período geológico Terciário (PACHECO, 2012).

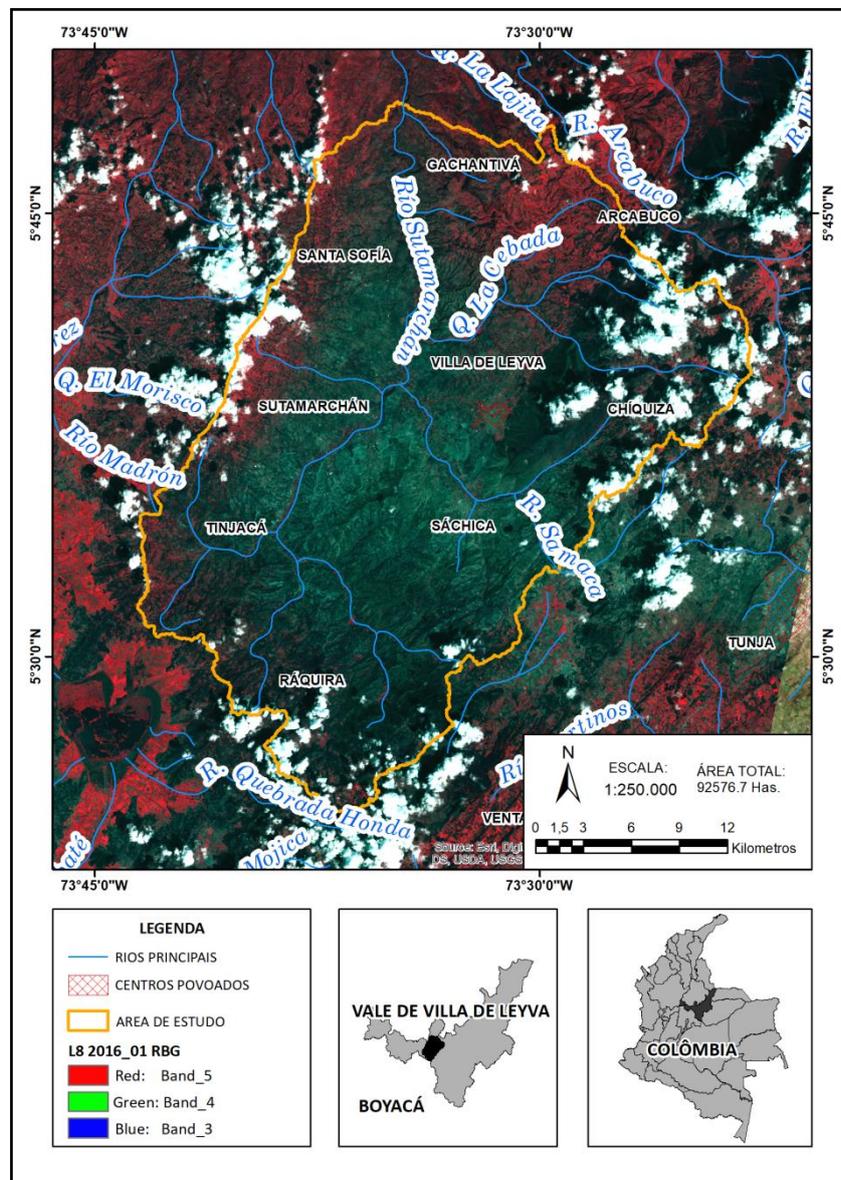


Figura 2: Localização da área de estudo. Imagem Landsat 8, em composição colorida falsa-cor 543-RGB, no centro da área situa-se o “deserto de La Candelária”, Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia.

2.1 Componente Biofísico da área de estudo

2.1.1 Geologia

Segundo (CORPOBOYACÁ, 2015), a área de estudo faz parte do Grupo Geológico denominado “Chiquinquirá - Arcabuco”, e a maior área está composta pela formação “Paja” com o símbolo (b2b6-Sm) contem material geológico integrado por: folhelhos negros com gesso, chert, calizas e arenitos, e a idade desta formação é do período cretáceo inferior. Esta formação é onde acontecem os processos erosivos com maior intensidade.

A área (Q-ca) está conformada por leques aluviais e depósitos coluviais onde acontecem processos erosivos com alto grau de desenvolvimento, caso contrario acontece nas regiões identificadas nas unidades cronoestratigráficas identificadas com o símbolo (b1-Sct), onde os processos erosivos são pouco visíveis nessas áreas.

A área de estudo tem fortes processos de erosão determinados pela baixa resistência do material geológico, uma vez que a região tem pouca cobertura vegetal. Mostra conjuntos de lutitas e material calcário em áreas onde o desenvolvimento de ravinas e fenômenos de deslizamentos em encostas, que são desestabilizados é evidente, e a drenagem é absorvida facilmente formando áreas desertas com processos de erosão dentro dessas camadas do solo (MOLANO, 1990).

Na área também se encontra um conjunto de material tipo argilas no nível da superfície e são altamente suscetíveis à erosão nas unidades cronoestratigráficas identificadas com os símbolos (k6E1-Stm, E1-Sc, e6e9-Sct) localizadas na região sul este da área de estudo.

A maioria dos processos erosivos na área de estudo ocorre devido à disposição dos sedimentos marinhos, com processos de meteorização profunda, encostas íngremes e cobertura de vegetação baixa. As áreas com maiores processos de degradação dos ecossistemas e processos erosivos ocorrem sobre a rocha-mãe (MOLANO, 1990).

Na Figura 3 se apresenta o mapa geológico da área de estudo elaborado com escala 1:500.000 e na Tabela 1 podem-se observar as unidades cronoestratigráficas, a idade e a extensão de cada uma delas.

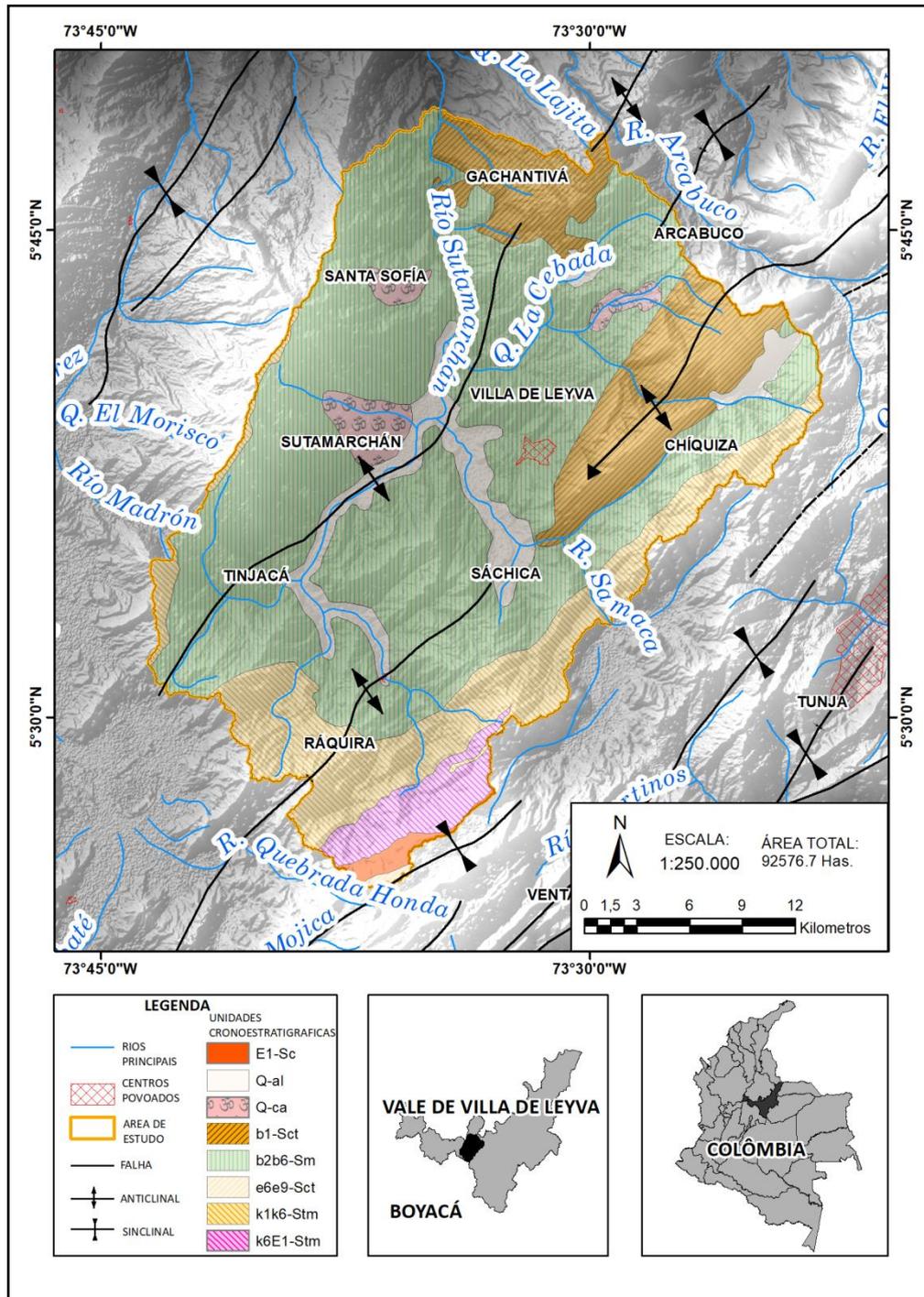


Figura 3: Mapa Geológico da área de estudo. Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia.

Fonte: Serviço Geológico Colombiano, 2015.

Tabela 1: Tipos de unidades cronoestratigráficas da área de estudo.

SIMBOLO	DESCRIÇÃO	IDADE	AREA HECTARES.
E1-Sc	Conglomerados misturados com arenitos de grão médio a grosso e lamitos com carvão	Paleoceno	642,29
Q-al	Depósito aluvial e plainícies aluviais	Quaternário	6399,25
Q-ca	Leques aluviais e depósitos coluviais	Quaternário	2487,16
b1-Sct	Quartzo-arenitos de grão fino a conglomeráticas com misturas de lodolitos e conglomerados	Cretáceo inferior	12547,01
b2b6-Sm	Folhelhos negros com gesso, chert, calizas e arenitos	Cretáceo inferior	54098,54
e6e9-Sct	Arenitos de grão fino a conglomeráticos interestratificados com argilas compactas e siltitos	Oligoceno - Eoceno	161,4613
k1k6-Stm	Folhelhos, calizas, fosforites, chert e quartzo arenitos. Predomínio de fácies mais arenosas	Cretáceo superior	13364,77
k6E1-Stm	Argilas compactas vermelhas com mistura de quartzo-arenitos de grão fino. Mantos de carvão na base	Cretáceo superior - Paleoceno	2863,49
		TOTAL	92563,97

2.1.2 Geomorfologia

A geomorfologia tem como objetivo a descrição das formas do terreno, a sua gênese, evolução, natureza dos materiais, classificação das unidades da paisagem e a análise e explicação dos processos que modelaram o terreno. As unidades geomorfológicas presentes na área de estudo foram identificadas a partir do mapa elaborado pelo IGAC, com uma escala 1:500.000.

As principais unidades geomorfológicas identificadas na área de estudo correspondem a paisagens de montanha estrutural erosional com declividades menores e maiores do 50%, com drenagens imperfeitas a excessivas, como pode ser observada na Figura 4. Estes tipos de relevos são geralmente compostos por encostas íngremes com declividades medias e curtas. A paisagem foi modelada por escorregamento difuso e concentrado com processos de remoção em massa. Dentro destas paisagens encontram-se os seguintes tipos de relevo: “*vigas*”, lombas, glaciais e encostas (CORPOBOYACÁ, 2015).

Outra unidade identificada é a paisagem de montanha gravitacional com declividades maiores do 50% e com drenagem imperfeita a excessiva. O mapa com as unidades geomorfológicas na área de estudo se apresenta na Figura 5.



Figura 4: Montanhas estruturais erosionais entre os municípios de Villa de Leyva e Sutamarchán.

Fonte: CORPOBOYACA, 2015

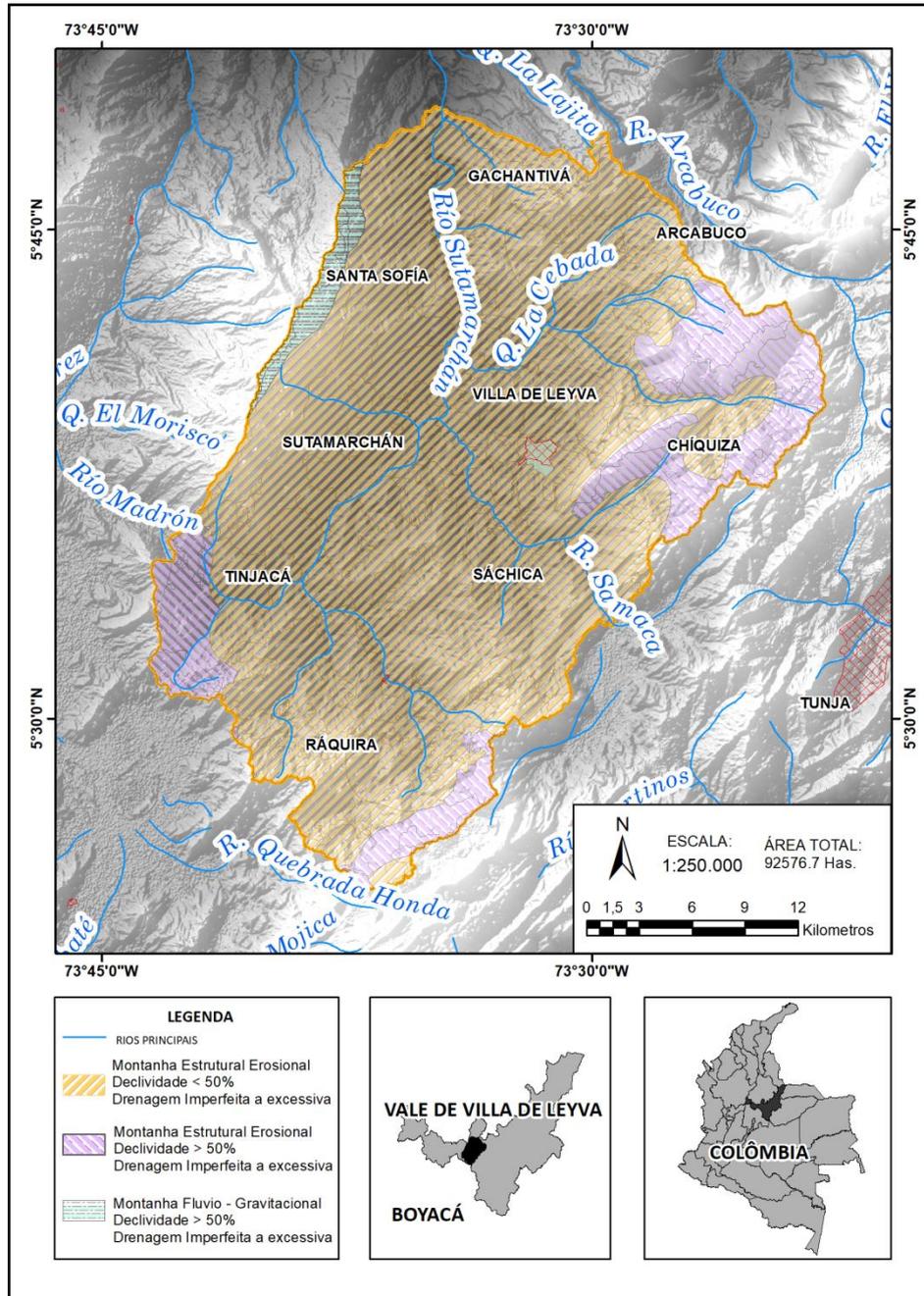


Figura 5: Mapa Geomorfológico da área de estudo. Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia.

Fonte: SIGOT, 2010.

2.1.3 Pedologia

A maior parte dos solos da área de estudo está constituída em áreas com fortes processos de erosão, estes tipos de solos têm pouca evolução, o que quer dizer que existe presença forte de solos degradados. O uso não sustentável traz como consequência a perda deste recurso até o ponto que a recuperação de esses solos é muito demorada e com custos econômicos e sociais altos.

Os mapas dos solos apresentam regiões ou conjuntos de áreas delimitadas por polígonos, cada um destes polígonos delimitados e identificados com símbolos nos mapas conforma uma unidade cartográfica do solo. As unidades cartográficas utilizadas na atualidade para estes tipos de estudos na Colômbia, e que se encontram na área de estudo, são descritas a continuação:

- Associação: São unidades que contem dois ou mais tipos de solos dominantes y se encontram relacionados geograficamente.
- Consociação: São unidades de solos mais simples, só um tipo de solo domina essa unidade com mais do 50% dos solos.
- Complexo: Esta unidade apresenta dois ou mais tipos de solos, podem ser dominantes e estar relacionados geograficamente, mas a sua identificação é difícil pelos seus padrões de distribuição na unidade.
- Miscelânea: Áreas que não contem solo e apresentam restrições para o uso agrícola, como: areais, afloramentos rochosos, corpos de água, etc.

Segundo o Estudo Geral de Solos e Zoneamento das Terras para o departamento de Boyacá, elaborado pelo IGAC-UPTC, 2005, os símbolos das unidades de solos estão representados, na maioria, por três letras maiúsculas que indicam: a unidade de paisagem, o clima, e o conteúdo pedológico.

A seguir, o mapa dos solos da área de estudo com as respectivas unidades:

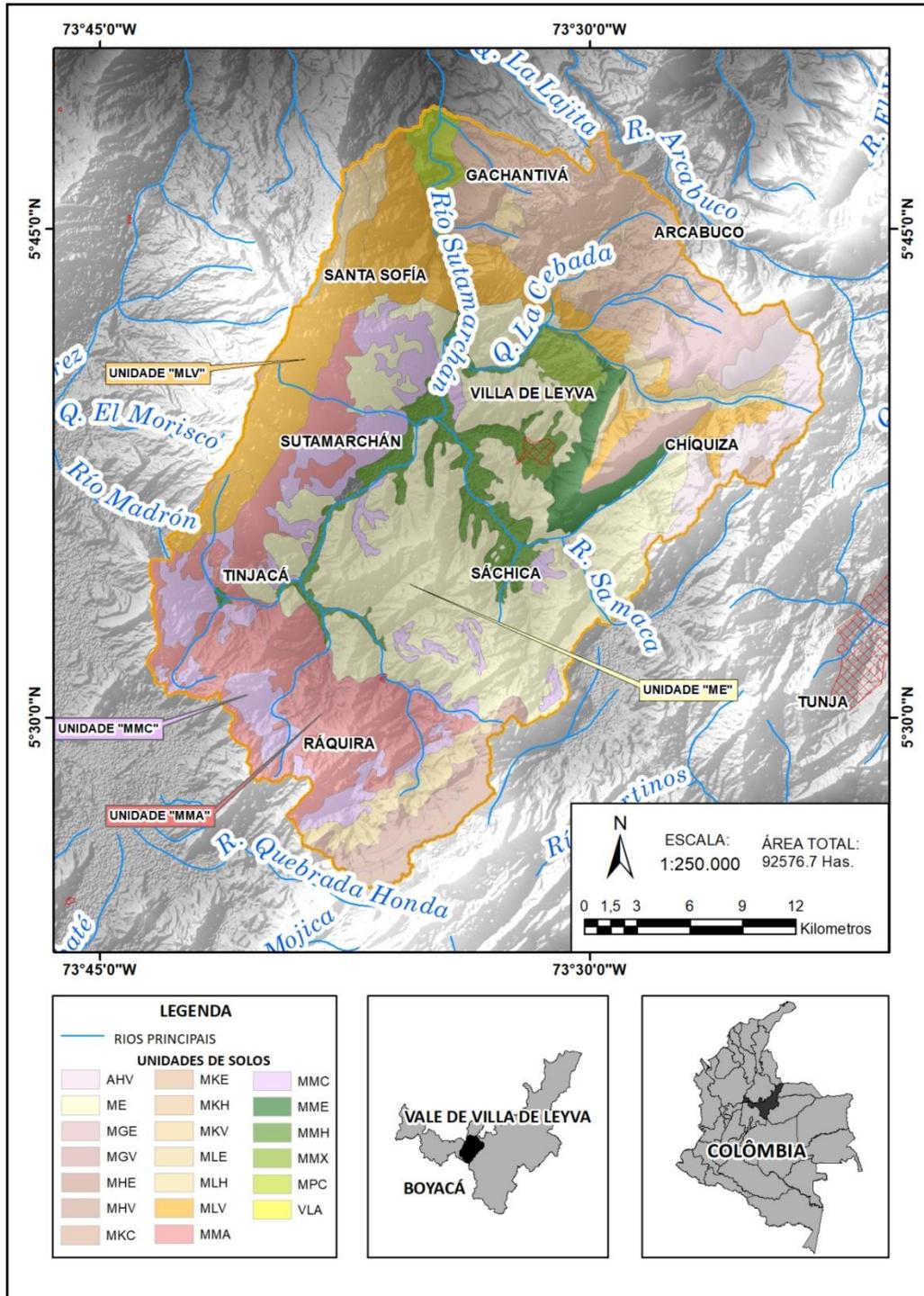


Figura 6: Mapa de Solos da área de estudo. Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia.

Fonte: IGAC, 2010.

Letras empregadas para a unidade de paisagem que existem na área de estudo:

- M = Montanha, A = Altiplanicie (Planalto), V = Valle (Vale)

Letras empregadas para o clima:

- E = Extremadamente frio úmido e muito úmido, G = Muito frio muito úmido, H = Muito frio úmido, K = Frio muito úmido, L = Frio úmido, M = Frio seco, P = Médio muito úmido

A última letra que compõe a simbologia explica o conteúdo pedológico, de uma maneira muito específica, tendo em conta a combinação entre a unidade da paisagem e o clima. As unidades de solos que maior presença tem na área de estudo (aproximadamente o 60%), são apresentadas com os seguintes símbolos: ME, MMA, MLV, MMC, e descritas a continuação:

- ME (Miscelânea Erodida):

As áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 26% do total da área de estudo, com uma extensão de 24337 hectares., sendo a maior unidade. Estas áreas apresentam um relevo com declividades maiores ao 50%, os ventos fortes e os padrões da distribuição da precipitação não ajudam com os processos formadores dos solos e como consequência, o escorregamento difuso e concentrado é muito intenso gerando processos de erosão hídrica muito alta com afloramentos do material parental (argilas vermelhas, Folhelhos negros, siltitos e arenitos).

- MMA (Associação Inceptic Haplustalfs – Lithic Ustorthents – Lithic Dystrustepts):

As áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 13% do total da área de estudo, com uma extensão de 12094 hectares., bordando a maior parte da unidade ME. Os tipos de relevo de estas áreas apresentam encostas íngremes, com declividades até o 75% com evidencias de processos de escorregamento difuso em grau leve e pedregosidade superficial. Os solos contem texturas médias, fortemente ácidos, fertilidade muito baixa.

Estes solos foram formados principalmente por rochas sedimentares clásticas misturadas (arenitos, lutitas, argilitos, siltitos, lodolitos e folhelhos).

- MLV (Associação Pachic Fulvudands – Andic Dystrudepts – Humic Dystrudepts):

As áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 12,9% do total da área de estudo, com uma extensão de 11917 hectares., o relevo de esta unidade é de declividades moderadas (12-25%) até fortemente quebrado (25-50%) e levemente íngreme

(50-75%), afetados por escorregamento difuso, apresentam erosão de tipo laminar e movimentos em massa, os solos são ácidos e a fertilidade é leve e baixa .

- MMC (Associação Typitic Haplustepts – Entic Haplustolls – Lithic Dystrustepts):

As áreas que se encontram dentro de esta unidade concentram o 10% do total da área de estudo, com uma extensão de 9258 hectares., O relevo está composto por glaciais e lombas com declividades do 12-25% e 25-50% respectivamente, os solos localizados nos glaciais foram originados com base em depósitos clásticos gravigênicos e hidrogravigênicos, os solos das lombas tem evoluído a partir de rochas sedimentares compostas por arenitos, lutitas, lodolitos e siltitos. Estes tipos de solos estão afetados por escorregamento difuso em grau moderado.

Na Tabela 2 se apresentam os tipos de solos, as unidades as que pertencem e as áreas respectivas:

Tabela 2: Unidades e tipos de solos da área de estudo

SIMBOLO	SIMBOLO_ANT	DESCRIÇÃO TAXONÔMICA	AREA HECTARES	PORCENTAGEM
AHV	AHVf1	Associação Pachic Melanudands – Humic Dystrudepts – Typic Hapludands.	3439,96	3,72
ME	ME	Miscelânea Erodida	24337,16	26,34
MGE	MGEg	Complexo Humic Lithic Dystrudepts - Afloramentos Rochosos -Typic Hapludands	2329,88	2,52
MGV	MGVe	Associação Typic Hapludands - Humic Dystrudepts	62,25	0,07
MHE	MHEf	Complexo Lithic Udorthents Oxic – Dystrudepts - Afloramentos Rochosos	2539,85	2,75
MHV	MHVd	Associação Typic Hapludands - Humic Pachic Dystrudepts - Typic Dystrudepts	1699,50	1,84
MKC	MKCd	Associação Humic Dystrudepts - Typic Udorthents	8713,46	9,43
MKE	MKEg	Complexo Lithic Udorthents - Typic Dystrudepts - Afloramentos Rochosos	704,16	0,76
MKH	MKHa	Associação Oxic Dystrudepts - Typic Udifluents	739,58	0,80
MKV	MKVd	Associação Typic Hapludands - Andic Dystrudepts - Typic Dystrudepts	1330,97	1,44
MLE	MLEg	Complexo Lithic Udorthents - Typic Dystrudepts - Afloramentos Rochosos	3191,26	3,45
MLH	MLHa	Consociação Fluvaquentic Humaquepts	395,99	0,43
MLV	MLVd1	Associação Pachic Fulvudands - Andic Dystrudepts – Humic Dystrudepts	11917,10	12,90
MMA	MMAf2	Associação Inceptic Haplustalfs – Lithic Ustorthents – Lithic Dystrustepts	12094,56	13,09
MMC	MMCd2	Associação Typic Haplustepts - Entic Haplustolls – Lithic Dystrustepts	9258,56	10,02
MME	MMEg	Complexo Lithic Ustorthents – Humic Dystrustepts – Afloramentos Rochosos	1959,62	2,12
MMH	MMHa	Complexo Lithic Ustorthents – Humic Dystrustepts – Afloramentos Rochosos	5171,63	5,60
MMX	MMXd1	Associação Humic Dystrustepts - Typic Haplustalfs – Typic Haplustands	1155,00	1,25
MPC	MPCep	Associação Chromic Hapluderts - Typic Dystrudepts	1248,30	1,35
VLA	VLAa	Associação Fluventic Dystrudepts - Vertic Dystrudepts – Aquic Melanudands	2,05	0,002
ZU	ZU	Zonas Urbanas	92,40	0,10
TOTAL			92383,25	100

Fonte: CORPOBOYACÁ, 2015; IGAC – UPTC 2005.

Tabela 3: Sistemas e equivalências na classificação dos solos

SiBCS - BRASIL	WRB/FAO	Soil Taxonomy
Argissolos	Acrisols	Ultisols
	Lixisols	Oxisols (Kandic)
	Alisols	
Cambissolos	Cambisols	Inceptisols
Chernossolos	Chernozems	---
	Kastanozems	Molisols (apenas os Ta)
	Phaeozems	---
Espodosolos	Podzols	Spodosols
Gleissolos	Gleysols	Entisols (Aquepts), Alfisols (Aqualfs) e Inceptisols (Aquepts)
Gleissolos Sálícos	Solonchaks	Aridisols e Entisols
Latosolos	Ferralsols	Oxisols
Luvisolos	Luvisols	Alfisols, Aridisols (Argids)
Neossolos	---	Entisols
Neossolos Flúvicos	Fluvisols	Entisols (Fluvents)
Neossolos Litólicos	Leptsols	Entisols (Lithic... Orthents; Lithic... Psamments)
Neossolos quartzarênicos	Arenosols	Entisols (Quartzipsamments)
Neossolos Regolíticos	Regosols	Entisols (Psamments e Orthents)
Nitossolos	Nitisols	Ultisols, Oxisols (Kandic), Alfisols
	Lixisols	
	Alisols	
Organossolos	Histosols	Histosols
Planossolos	Planosols	Alfisols
Planossolos Nátricos	Solonetz	Alfisols (Natrustalfs e Natrudalfs)
Planossolos Háplicos	Planosols	Ultisols (Albaquults e Plintaquults) e Alfisols (Albaqualfs e Plintaqualfs)

Plintossolos	Plinthosols	Alfisols (Plintaqualfs), Ultisols (Plintaquults) e subgrupos Plinthic de várias classes de Oxisols, Ultisols, Alfisols, Entisols e Inceptisols
Vertissolos	Vertisols	Vertisols
Não classificados no Brasil	Cryosols	Gelisols
	Anthrosols	---
	Andosols	Andisols
	Umbrisols	---
	Gypsisols	Vários subgrupos de Aridisols
	Durisols	Vários grandes grupos Dura de Alfisols, Andisols, Aridisols, Inceptisols, etc.
	Calcisols	Vários subgrupos de Vertisols, Molisols, Inceptisols, Alfisols, etc.
	Albeluvisols	Alfisols (Glossaqualfs, Glossocryalfs, Glossudalfs, etc.)

Fonte: Embrapa, 2017

Os processos de erosão sobre os solos são na forma de erosão hídrica superficial e sub-superficial, que resultou na criação de uma rede de ravinas e voçorocas com diferentes graus de desenvolvimento. Os processos de caráter geomorfológico, bioclimáticos e dos solos devem ser relacionados com a ação antrópica, pois por muito tempo, durante períodos diversos, diferentes populações tanto no período pré-colombiano quanto no período colonial intervieram e transformaram o território em diferentes graus ou tipos (MOLANO, 1990).

2.1.4 Aspectos climáticos

A área de estudo está concentrada em um vale onde são predominantes as condições de aridez, seca e aquecimento, as condições de precipitação e temperatura formam uma paisagem semi árida; também tem luz solar intensa durante todo o ano, mas ela é regulada por um regime de precipitação bimodal e a temperatura é ajustada com a altura acima do nível do mar. A precipitação média anual oscila entre 33 mm no mês de julho (mês mais seco) e 140 mm no mês de outubro (mês com mais chuva) (Figura 7). Com base nas informações apresentadas nas Figuras 8 e 9, é possível observar que o mês de temperatura média mais elevada é março, com um recorde de 17,5 ° C, enquanto julho é o mês com as

temperaturas mais baixas de 16,2 ° C em média. Nas zonas de montanha, a precipitação aumenta significativamente, porque a mudança de altitude apresenta diferentes condições geográficas para a transição de paisagens do “deserto” para não desérticos (Fonte: <http://pt.climate-data.org/location/50004/>). A precipitação e a temperatura foram calculadas com a média dos valores anuais da estação meteorológica do IDEAM “Villa de Leyva” desde o ano 1958 até 1972, pois não esta mais em funcionamento. É importante salientar que a estação meteorológica estava localizada perto da área urbana do município, portanto, na área de “deserto”, essas características são diferentes, com menos chuva e temperaturas mais altas devido às condições biofísicas da área.

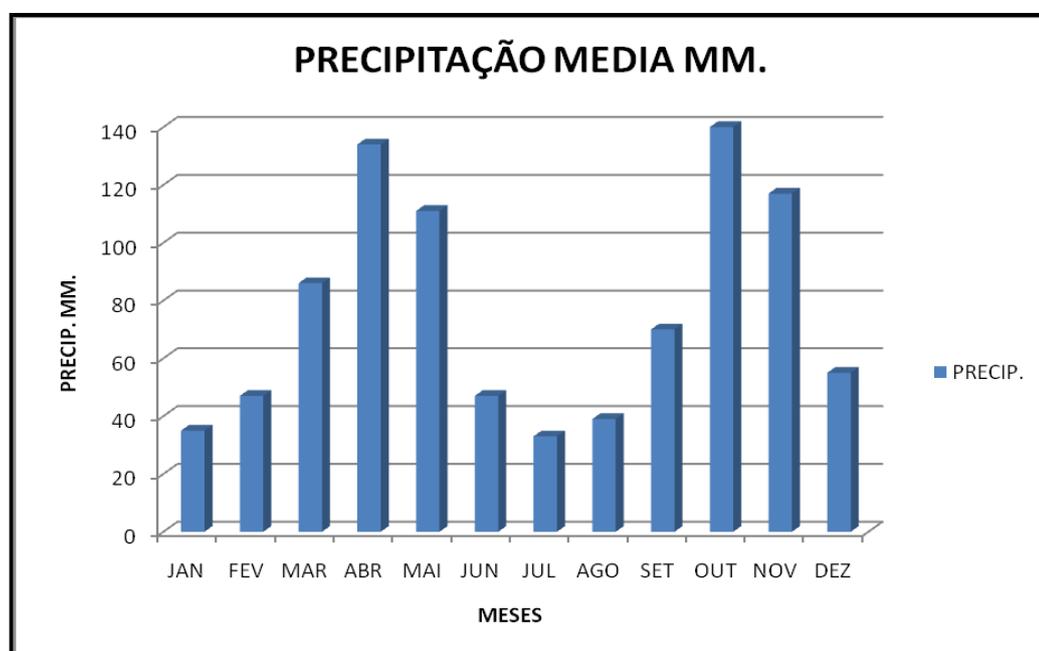


Figura 7: Precipitação anual média em mm/ano, município de Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia.

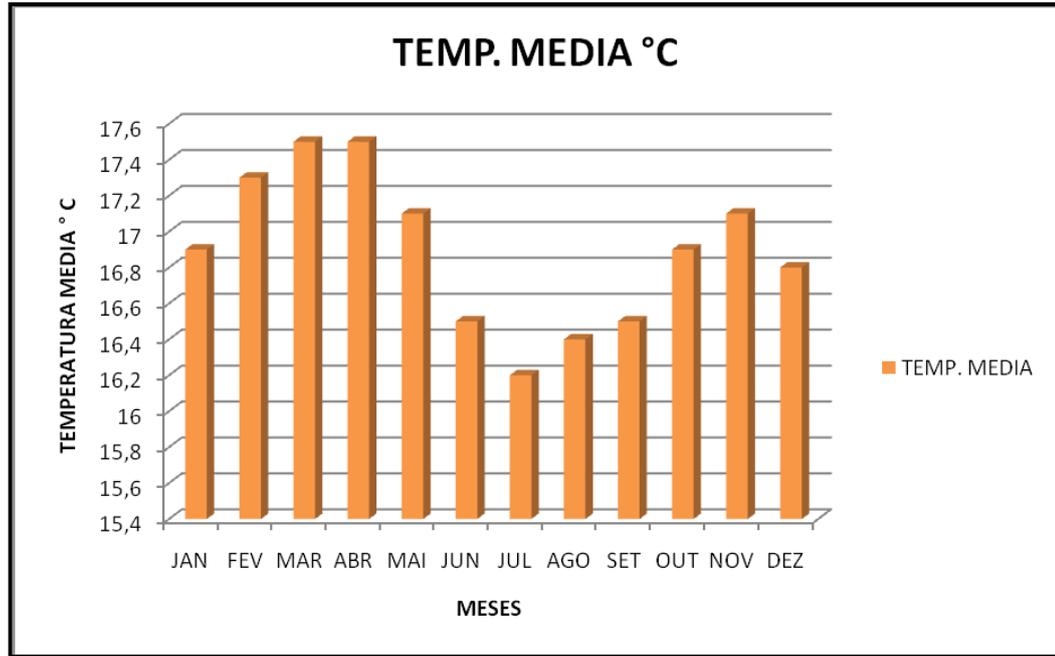


Figura 8: Temperatura média anual em °C, Município de Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	16.9	17.3	17.5	17.5	17.1	16.5	16.2	16.4	16.5	16.9	17.1	16.8
Temperatura mínima (°C)	10.9	11.4	11.9	12.5	12.4	11.8	11.3	11.4	11.4	12	12.1	11.3
Temperatura máxima (°C)	22.9	23.2	23.2	22.5	21.9	21.2	21.1	21.4	21.7	21.8	22.1	22.3
Temperatura média (°F)	62.4	63.1	63.5	63.5	62.8	61.7	61.2	61.5	61.7	62.4	62.8	62.2
Temperatura mínima (°F)	51.6	52.5	53.4	54.5	54.3	53.2	52.3	52.5	52.5	53.6	53.8	52.3
Temperatura máxima (°F)	73.2	73.8	73.8	72.5	71.4	70.2	70.0	70.5	71.1	71.2	71.8	72.1
Chuva (mm)	35	47	86	134	111	47	33	39	70	140	117	55

Figura 9: Dados de precipitação e a temperatura média anual, Villa de Leyva, Boyacá, Colômbia

Segundo a classificação climática de Köppen, a área de estudo está localizada na área de clima (Csb), Oceânico - Mediterrâneo, dependendo da altitude, a região tem temperaturas classificadas como frescas, que variam entre 10° C e 17,5° C. No entanto, pode-se definir a área de estudo dentro de uma zona típica de ecossistemas semi-áridos com alta presença de mato seco, e em processos de desertificação, que estão acima de 2000m pertencentes à zona do enclave seco do Vale de Villa de Leyva (GONZÁLEZ-M. e LÓPEZ-CAMACHO, 2012).

2.2 Contexto histórico da área de estudo

Os primeiros povoadores desta região chegaram há milhares de anos e as suas técnicas agrícolas no início do período de povoamento começaram com pouca transformação do meio ambiente. Após o estabelecimento dos indígenas na região, os aspectos como o descobrimento do fogo, o desenvolvimento tecnológico (ferramentas), a coleta de frutas, a caça de animais, assim como a coleta de madeira e a produção de cerâmicas tiveram maior incidência nos ecossistemas (MOLANO, 1990). Esses modos de produção estavam planejados com base nas dinâmicas naturais e temporais do ecossistema, permitindo um uso mais sustentável dos recursos e a renovação destes.

Algumas narrações históricas descrevem que no momento da chegada dos espanhóis o relevo da região do vale de Villa de Leyva era relativamente plano, o clima agradável, a oferta de matérias de construção e a disponibilidade de água doce foram condições de vantagens para o estabelecimento da população e o desenvolvimento de atividades agropecuárias, sendo a resistência indígena a maior dificuldade para ocupar essas terras (PACHECO, 2012).

A atividade humana na área contribuiu para a transformação da paisagem, desde o início do povoamento. Mas o processo real de desertificação começou desde a época da conquista espanhola, devido a esta área ter muita semelhança com as condições da paisagem mediterrânea europeia tornando mais intensa a intervenção no meio ambiente.

A passagem de um sistema econômico solidário de tipo agrícola, para um sistema econômico baseado na exploração dos recursos naturais e matérias primas, mineração, como também a criação de gado, foi o passo para ingressar no sistema capitalista imposto pela Europa. O excesso de exploração dos recursos naturais pelo crescimento da produção e a produtividade acabou causando a degradação massiva do solo, transformando-o em zonas de ravinas e voçorocas. O mesmo aconteceu com a vegetação nativa, cuja maior parte foi explorada para aproveitar a madeira e para criar zonas de pastoreio (MOLANO, 1990).

Uma das atividades que teve um impacto forte nessa região foi a substituição da agricultura de produtos nativos por grandes plantações de trigo e cevada, para o desenvolvimento desta atividade era necessário construir moinhos de água. Segundo

Molano, (1990), a área contava com aproximadamente 27 moinhos, a construção destes moinhos implicou a modificação da trajetória natural dos rios e arroios, e uma excessiva exploração dos recursos hídricos para movimentar toda a sua estrutura. A região ficou com uma disponibilidade de água menor do que já tinha, gerando processos de aridez e perda de solo. Hoje, os moinhos não possuem funcionalidade, mas alguns estão conservados como atrativo turístico (VILLEGAS, 2004). A estrutura dos moinhos da época, o sistema de captação para o aqueduto e o açude de armazenamento são apresentados entre as Figuras 10 e 13.

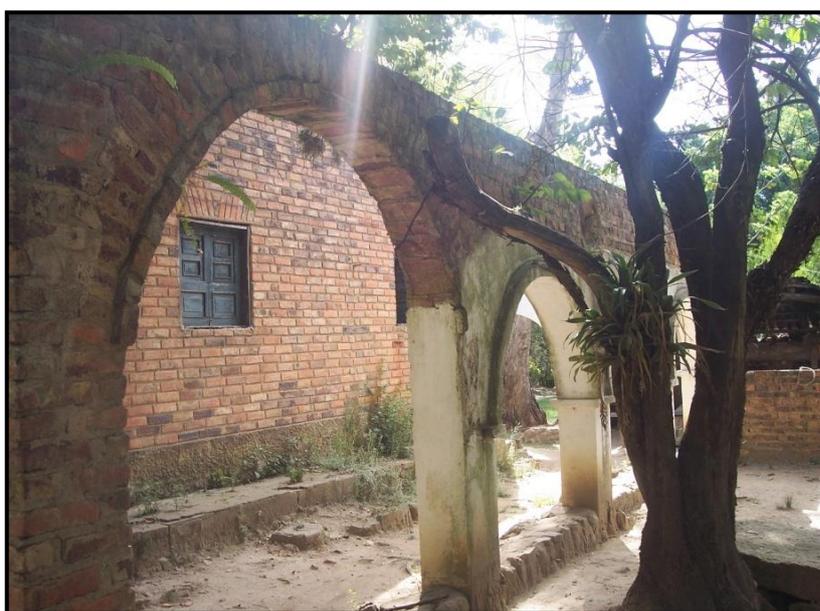


Figura 10: Aqueduto construído para conduzir a água do moinho na região.

Fonte: Trabalho de campo, 2007.

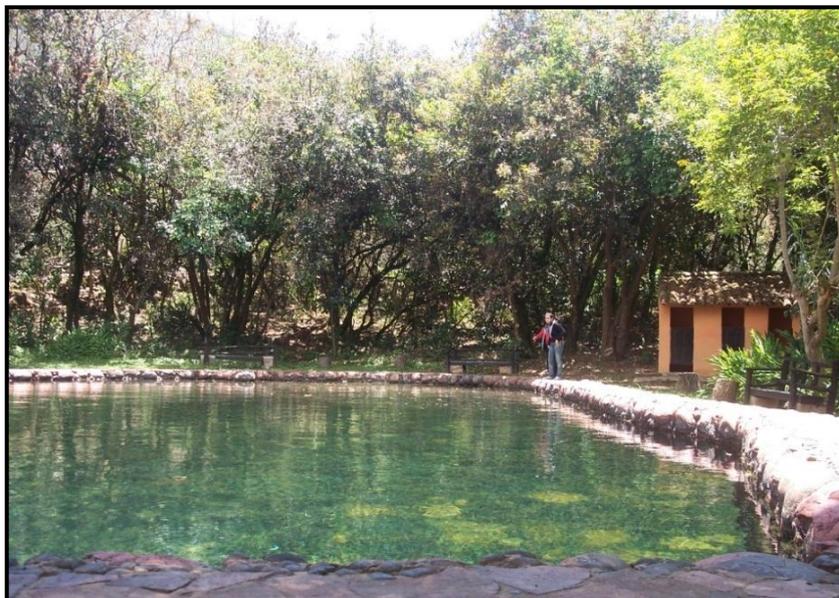


Figura 11: Açude para armazenamento da água do moinho

Fonte: Trabalho de campo, 2007.

Além de precisar de um açude e de um sistema de aqueduto na fazenda, também se fazia necessário o sistema para levar a água até a estrutura principal (Figuras 12 e 13).



Figura 12: Sistema de condução da água até a estrutura principal do moinho

Fonte: Trabalho de campo, 2007.



Figura 13: Moinho de água, ponto de coleta da farinha moída.

Fonte: Trabalho de campo, 2007.

Outra das dinâmicas socioeconômicas que estavam presentes no Vale de Villa de Leyva na época pré-colombiana e que após o período colonial foi desenvolvida mais intensivamente é a exploração de argilas para produzir artesanato (cerâmicas) e materiais de construção (tijolo e telhado de tipo colonial). Este tipo de produção teve um crescimento muito forte desde a etapa da colônia, pois o material era de boa qualidade para este tipo de elementos.

A fundação e o crescimento das cidades sob o modelo espanhol foi se incrementando de maneira espacial e temporal e a sua construção demandava grandes quantidades deste tipo de material. Como consequência ocasionou o desmatamento da floresta andina nativa com o fim de aproveitar a madeira para a construção e como combustível para a cocção nos processos produtivos, provocando uma exploração excessiva destes recursos naturais (MONCADA RASMUSSEN, 2010). Atualmente estes processos ainda continuam, pois são as principais fontes econômicas da região, um exemplo é a produção de artesanato para a venda a nível nacional e internacional, já que esta região é o principal ponto de produção na Colômbia (Figuras 14 e 15).



Figura 14: Usina de processamento de argilas no Vale de Villa de Leyva

Fonte: Panoramio – Google Earth, 2017



Figura 15: Ponto de comercialização das cerâmicas produzidas na região.

Fonte: Trabalho de campo, 2017.

Na atualidade, o sistema de produção agrícola na região tem mudanças devido às novas dinâmicas do mercado. Os cultivos tradicionais eram principalmente a cebola e o milho. Hoje a uva para produção de vinho, e a produção massiva de tomate em estufa teve um grande crescimento, o que traz novas transformações ao meio ambiente com os efeitos socioambientais que correspondem (GÓMEZ SIERRA, 2013).

Assim os processos de transformação da paisagem, produto da conquista espanhola e das atividades atuais, tiveram impactos ambientais devido aos modos de apropriação e por processos tais como: a exploração excessiva do solo, aumentando as dinâmicas da movimentação da população; as novas tecnologias e uma organização socioeconômica dos novos colonos ignorando o funcionamento regular dos ecossistemas da época. Todos esses fatores originaram os diferentes tipos de transformações de tipo ambiental e cultural até a atualidade no vale de Villa de Leyva (PACHECO, 2012).

Molano, (1990), ao abordar as dinâmicas da região do vale de Villa de Leyva, diz o seguinte: “É de admirar que as paisagens de hoje, no vale de Villa de Leyva, guardam uma surpreendente semelhança pelas descrições feitas para o século passado. Por tanto, estas paisagens têm pelo menos 200 anos de existência e estão conservadas por ter atingido um estado de degradação irreversível, por um lado, e por continuar com as práticas intensivas hispânicas, por outro. Isso demonstra que uma análise espaço-temporal é fundamental para conseguir entender a atualidade e as modificações paisagísticas do passado”.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Para elaborar o referencial teórico deste trabalho foram abordados os seguintes eixos temáticos: O primeiro, um panorama geral dos processos de desertificação a nível global junto com umas definições e aproximações, como também o contexto de estes processos a nível nacional. O segundo eixo trata como é a abordagem de estudos sobre processos de desertificação com tecnologias da informação geográfica, e mais especificamente, com ferramentas de SIG e Sensoriamento Remoto. Neste componente de Sensoriamento Remoto aplicado em estudos de desertificação baseados nos índices de vegetação fornecidos pelo produto MOD13Q1 do sensor MODIS.

3.1 Processos de desertificação, definição e aproximações

Na Convenção das Nações Unidas para o combate contra a Desertificação, o conceito de desertificação foi associado como a degradação da terra e da vegetação, a partir da erosão do solo e das terras férteis em zonas áridas, semi-áridas, sub-úmidas secas, causadas principalmente por atividades humanas e das variações climáticas. A seca pode desencadear ou agravar os processos de desertificação (UNCCD, 1994).

É necessária e importante a realização de pesquisas sobre a questão da desertificação, já que a nível nacional foi considerado do interesse prioritário. O protocolo de diagnóstico da desertificação mostra brevemente quatro programas (luta contra a degradação da terra, gestão e uso sustentável da biodiversidade em ecossistemas secos, segurança alimentar e gestão e utilização eficiente dos recursos hídricos) (LIU *et al.*, 2003).

Com base na análise das variáveis atuando em processos de desertificação, há diferenças na definição do conceito de desertificação, bem como as medidas a serem tomadas para combater este fenômeno. Para definir se em uma área ocorrem processos de desertificação, dois aspectos importantes devem ser tomados em conta (VERDUM. R *et al.*, 2009):

(1) Evolução bioclimática nessas áreas para transformá-lo em um deserto; (2) Para fazer uma abordagem coerente com a definição de processos de desertificação, é necessário

analisar dois aspectos fundamentais: o lugar em que ocorrem e quando eles ocorrem. Além disso, é necessário definir os diferentes tipos de mudanças que foram feitas em relação aos processos da dinâmica ambiental, analisando os impactos destas mudanças nas organizações e nas atividades humanas.

A temática da desertificação tem sido estudada em diferentes países do mundo com diversidade de abordagens e quantidades, tendo as variações climáticas e as atividades humanas como denominador comum dos estudos dos processos de degradação do solo, especialmente a apropriação dos recursos naturais de forma insustentável, que causam danos ambientais e socioeconômicos nas áreas onde ocorre o processo.

Ao fazer a análise sobre os processos de desertificação, um dos componentes de maior importância é a análise da distribuição, da disponibilidade e da textura das diferentes coberturas vegetais. O que torna possível determinar os passos próximos para continuar com este tipo de análises de dinâmica ambiental e processos de desertificação (LIRA, 2004):

A) Definição das variáveis que caracterizam os processos de desertificação, de acordo com as características da área de estudo;

B) Estabelecer um modelo de análise que leva em conta essas variáveis;

C) Produção de informações geográficas em mapas temáticos que mostram os processos de desertificação em áreas suscetíveis ao fenômeno.

Considera-se importante fazer uma análise da evolução dos padrões de distribuição da vegetação, como também uma análise das mudanças de uso e cobertura do solo de acordo com sua textura, a partir de diferentes tipos de imagens de satélite.

A informação geográfica gerada a partir de sensoriamento remoto é usada para identificar e definir as mudanças do uso e cobertura do solo como as áreas afetadas, desta forma, também se pode definir métodos mais eficientes de luta contra o avanço dos processos de desertificação em regiões com ameaças fortes como a pressão demográfica, o sobrepastoreio, a expansão da fronteira agrícola, entre outros fatores. As informações geradas a partir de imagens de satélite permitem identificar elementos importantes na configuração da paisagem, tais como: estruturas geomorfológicas, uso da terra, solos expostos com processos de erosão, cobertura com presença de areia, entre outros. A

geração deste tipo de informação ajuda a estabelecer planos de gestão contra a degradação do solo e dos recursos naturais (ARNOUS *et al.*, 2009).

Esses itens principais que compõem a definição geral dada pela organização das Nações Unidas (degradação do solo, variações climáticas e atividades humanas) são amplamente discutidos por Souza, (2006) que analisa as definições das Nações Unidas e conclui que se faz necessário esclarecer como ocorrem os processos de degradação de terras, ampliando assim o entendimento das relações entre sociedade e natureza. Estas relações são inúmeras e cada vez mais são implementados diferentes conceitos e teorias sobre processos de degradação ambiental. Da mesma forma, é necessário definir como as variações climáticas e as atividades humanas estão realmente causando os processos de desertificação (FANG *et al.*, 2008).

No caso das zonas com risco de desertificação todos os tipos de mudanças estão muito relacionadas e tem a ver com a distribuição dos recursos hídricos (SPONSELLER e FISHER, 2006). As áreas agrícolas situam-se em torno da oferta de recursos hídricos e seu desenvolvimento é dado pela disponibilidade de água nas bacias média e altas, onde estão a maior parte das terras cultivadas como também os sistemas de irrigação. A utilização excessiva dos solos leva danos para os ecossistemas e uma transformação da paisagem na qual o ambiente natural é altamente transformado, causando os processos de desertificação (CHENG *et al.*, 2000).

A distribuição espacial dos elementos presentes no espaço geográfico está disposta de forma heterogênea e depende em grande parte da disponibilidade dos recursos hídricos. Mas em áreas sensíveis ao processo de desertificação a paisagem tende a mudar drasticamente, uma vez que os ecossistemas que são encontrados perto de corpos de água, são altamente vulneráveis à degradação (CHENG *et al.*, 2000).

Os processos de desertificação atualmente estão afetando grandes áreas no planeta Terra com diferentes conseqüências sociais e econômicas. Ainda não existe um consenso sobre definições a respeito da desertificação que sejam aplicáveis em diferentes regiões e aceitos pelos investigadores de diversas áreas de conhecimento. Assim, uma análise que quantifique as manifestações superficiais do fenômeno da desertificação desde as técnicas e processos do sensoriamento remoto pode ajudar a entender tal definição (LIRA, 2004).

Da mesma forma, é importante entender as variáveis que fazem parte dos processos de desertificação para a adoção de políticas com o objetivo de minimizar os efeitos ambientais e socioeconômicos deste tipo de processo, especialmente em regiões áridas, localizadas em países em desenvolvimento para preservar os recursos naturais e o desenvolvimento sustentável.

No caso da Colômbia, por outro lado, o país começou a fazer parte da Convenção das Nações Unidas de luta contra a desertificação (UNCCD), em junho de 2004. Este acordo, de que fazem parte outros 190 países, é um mecanismo global que visa o combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca. Ao nível das instituições do governo, a direção dos Ecossistemas do Ministério do Meio Ambiente, Habitação e Desenvolvimento Territorial (MAVDT), o programa das Nações Unidas para o desenvolvimento (PNUD) e o Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais (IDEAM), fez estudos conjuntos para o diagnóstico da situação da desertificação na Colômbia, que resultou na formulação do Plano Nacional de Ação de luta contra a desertificação e a seca (PAN). Da mesma forma, o Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, o IDEAM e o MAVDT têm preparado conjuntamente em 2010 um estudo que resultou no protocolo de identificação e avaliação dos processos da degradação dos solos e terras por desertificação.

3.1.1 Processos de desertificação gerados por erosão e salinização

Segundo o IDEAM, a Colômbia possui 245.342 km² de terras em zonas secas, aproximadamente 21% do território nacional, dos quais 78.9% apresentam algum grau de degradação por processos de erosão e salinização. Destes, 54% das áreas em degradação apresentam níveis de “muito severa” e “severa”, 26.2% apresentam uma degradação “moderada” e 17.4% uma degradação baixa. Estes processos dão origem a ambientes susceptíveis à desertificação (IGAC; *et al.*, 2010a).

Os processos de erosão do solo fazem referência à diminuição ou mudança negativa na oferta de serviços ecossistêmicos e ambientais que os solos fornecem, ocasionado por fatores naturais e/ou humanos, que em algumas situações críticas, podem causar a perda parcial ou total deste componente ambiental. A degradação do solo por erosão faz referência à perda da capa superficial da Terra por ação da água ou do vento que é

quantificada sob diferentes métodos e traz conseqüências ambientais e socioeconômicas (IGAC; *et al.*, 2010b).

Geralmente existem dois tipos de erosão, a hídrica, que é causada pela ação da água em áreas onde não existe cobertura vegetal levando partículas e formando ravinas e voçorocas com possibilidade de ocorrer fenômenos de movimentos em massa, com os quais é deslocada uma porção deste solo. A erosão eólica é causada pelo vento que leva e transporta partículas do solo, como areia ou argilas produzindo acumulações e formando dunas, areais ou restingas (LÓPEZ *et al.*, 2010).

O conceito de salinização é definido como um processo, natural ou causado pelo ser humano, no qual acontece o aumento ou ganho de sais solúveis no solo, ocasionando efeitos negativos sobre a qualidade ambiental dos solos e conduzindo à sua degradação. O processo de salinização pode acontecer por fatores internos ou externos como: variabilidade e mudanças climáticas, material parental do solo, relevo e coberturas, ou também pela utilização e manejo do solo (IGAC; *et al.*, 2010c).

3.2 Tecnologias da Informação Geográfica

3.2.1 Aplicações em estudos sobre processos de desertificação

Os estudos sobre as dinâmicas ambientais e as mudanças no território através dos indicadores de degradação ambiental são de muita utilidade para analisar os padrões espaciais e os processos que levam à distribuição dos elementos presentes no território de natureza biofísica e socioeconômica e a heterogeneidade desta distribuição (SÁNCHEZ-FLORES *et al.*, 2008). Neste sentido, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem bastante importância para este tipo de análise, já que ele é capaz de processar e gerar informações em diferentes níveis de escalas sobre a composição e configuração da paisagem (SINGH *et al.*, 2010).

A abordagem dos estudos sobre a desertificação a partir da aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto tem várias possibilidades sobre o uso de diferentes métodos para a definição das variáveis mais importantes de acordo com a disponibilidade de informações e

as características da área de estudo. Em termos de desenvolvimento de uma investigação, de um modo geral, várias etapas são estabelecidas:

- Coleta de dados estatísticos fornecidos por organizações ou entidades governamentais;
- Análise de cartografia básica em formato impresso ou analógico;
- Análise de imagens de satélite de acordo com suas características sobre as resoluções espacial, temporal e radiométrica.

Desde o desenvolvimento do estudo que incorpora análise em escalas temporais e em escalas do tipo regional, uma solução é a implementação de imagens de satélite de diferentes resoluções espaciais, espectrais e temporais, pois oferecem vantagens em matéria de aquisição, cobertura e processamento (HERNÁNDEZ LEAL, 2006).

Durante décadas, as fontes de Informação geográfica para a análise espacial tinham como fonte de informações analógicas a cartografia básica e as fotografias aéreas. Essas fontes de informação, na época, forneciam dados valiosos para análise espacial e unidades de paisagem, mas o processamento desses dados exigia bastante tempo e esforço.

Com o advento das tecnologias de informação geográfica no campo digital, tais como o Sistema de Posicionamento Global - GPS, Sistemas de Informação Geográfica - SIG - e o Sensoriamento Remoto, o sistema de aquisição, manipulação e processamento de dados é feito de uma forma mais simplificada e com ferramentas que facilitam a geração de nova Informação Geográfica para análise espacial (XIAOFENG *et al.*, 2009).

Na atualidade existem diferentes tipos de satélites de Sensoriamento Remoto que fornecem informações sobre a cobertura e uso do solo na superfície da Terra. Embora existam muitos tipos de satélites que fornecem informações, é necessário fazer uma revisão adequada para identificar quais são os mais apropriados para este tipo de estudo. Para agilizar esse processo deve-se levar em conta diferentes aspectos: A) Estabelecer os objetivos da pesquisa; B) Identificar as características do lugar a analisar; C) Identificar as resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal que ajudarão a alcançar os aspectos anteriores.

É por estas diferentes razões que as relações entre os processos da dinâmica ambiental e sensoriamento remoto são bastante ligadas. A espacialidade da informação é muito importante quando se trata de analisar fenômenos e processos das dinâmicas ambientais, pois as imagens de satélite atualmente fornecem grande parte das informações do tipo de uso e cobertura do solo (SHAO e WU, 2008).

As imagens de satélite são instrumentos com elevado potencial para fornecer informações sobre o território, pois ajudam a fazer um reconhecimento e uma interpretação da paisagem e realmente geram um impacto visual, fazendo com que os métodos de identificação de padrões e processos dinâmicos, como o planejamento do trabalho de campo, sejam mais produtivos (GROOM *et al.*, 2006).

A abordagem dos estudos sobre os processos de desertificação, através da análise e interpretação das dinâmicas ambientais, juntamente com a implementação da análise de técnicas de sensoriamento remoto fornece um quadro de referência adequado para este tipo de abordagem temática. Os processos de identificação, quantificação e análise da dinâmica da transformação e da degradação da terra em todos os tipos de paisagem têm sido feitos eficientemente usando imagens de satélite. As técnicas de detecção de mudanças por diferentes processos de transformação ambiental têm sido amplamente desenvolvidas a partir da análise de bandas espectrais para os procedimentos mais complexos suportados com ferramentas de análise e modelagem espacial (FRAU *et al.*, 2010).

A abordagem sobre os processos de desertificação no Vale de Villa de Leyva, Boyacá - Colômbia contém alguns dos conceitos básicos e componentes metodológicos da análise e do processamento de imagens do satélite MODIS para o desenvolvimento de indicadores que demonstrem esses processos. O desenvolvimento daqueles indicadores conduz a geração de resultados que manifestam a transformação do território em várias escalas da análise das dinâmicas ambientais. As mudanças no território surgem de fatores tanto biofísicos quanto socioeconômicos gerando vários efeitos espaciais, como a fragmentação do habitat em diferentes unidades de análise neste tipo de estudo (MARRUBIO, 2004).

A análise das mudanças e dinâmicas ambientais tem grandes contribuições no tratamento e interpretação de imagens de Sensoriamento Remoto, oferecendo dados reais e tangíveis para a quantificação de áreas degradadas por fenômenos naturais e antrópicos

como a desertificação. A este respeito, as informações fornecidas por imagens de satélite representam a possibilidade de obter novas informações para realizar análises com baixo custo (em alguns tipos de imagens) com o objetivo de avaliar várias extensões territoriais e com difícil acesso, em alguns casos (MATA *et al.*, 2014).

As maiorias das metodologias para avaliar a desertificação se encontram baseadas em indicadores para quantificar e diagnosticar o estado do fenômeno. Conforme o Frau *et al.* (2010), Diagnostica processos de desertificação na região do Maule no Chile por médio da técnica RCEN – Rotação Controlada por Eixo de não Mudança a partir de operações de multiplicação de fatores relacionados ao eixo formado pela reta de regressão da radiometria dos pixels de não mudança das imagens. Essa análise foi feita a partir de imagens Landsat com os pixels que não apresentam mudanças. Os pesquisadores concluem que o mapa final de mudanças tem um índice de Kappa de 0.74, apresentando uma concordância adequada entre o resultado da técnica e os dados coletados em campo.

Conforme o Changzhen *et al.* (2005), para o diagnostico dos processos de desertificação são utilizados os dados de NDVI do sensor MODIS, pois permite analisar as mudanças globais desde o ano 2000 até a atualidade e a suas características resultam muito úteis para analisar processos de desertificação com maior precisão e rapidez. Esse trabalho teve como objetivo determinar a capacidade do sensor MODIS para avaliar processos de desertificação uma zona agropastoril numa região semiárida na China.

O método para identificar as áreas com processos de desertificação foi uma classificação da imagem em quatro categorias: Movel, Semi-móvel, semi-fixo e fixo, de acordo com o padrão de distribuição das zonas identificadas com areais. Segundo Changzhen *et al.* 2005, as áreas identificadas com maiores processos de mudança dinâmica correspondem com a realidade e o resultado foi comparado com imagens Landsat da época para avaliar a precisão. Por isso, a informação que contem o Sensor MODIS é de qualidade e permite analisar este tipo de processos.

O trabalho realizado por Arnous *et al.* (2009), faz uma abordagem das mudanças ambientais para identificar e localizar os processos de degradação da terra numa região localizada ao sul da Tunísia. Técnicas de Sensoriamento Remoto foram utilizadas para definir os limites das zonas afetadas pela desertificação com imagens de alta resolução como Quick

Bird e media resolução como a Landsat ETM+ de maneira simultânea. As imagens foram interpretadas visualmente para definir classificações supervisionadas e não supervisionadas. O resultado foi o mapeamento da região e gerar o mapa morfodinâmico, mapa de ocupação do solo e o mapa de vulnerabilidade a desertificação. No mapa de vulnerabilidade à desertificação os pesquisadores definiram sete categorias incluindo alta, moderada e baixa ameaça, sendo o resultado adequado para identificar as áreas afetadas e as que estão em risco.

No caso da Argentina, Gaitán *et al.* (2015), geraram indicadores para diagnosticar a degradação de terras por desertificação por meio de análises de tendências do NDVI do sensor MODIS entre os anos 2000 e 2014. Foram calculadas as integrais anuais junto com a regressão linear entre o tempo (variável X) e o valor do NDVI (variável Y) para cada pixel das imagens. O resultado foi um mapa das áreas com tendência significativa positiva, negativa e áreas sem tendência. Além disso, foram estabelecidas as taxas de diminuição ou aumento do NDVI para identificar os tempos de ocorrência dos processos de degradação ou recuperação dos ecossistemas.

Lamchin *et al.* (2016), realizaram um estudo com o objetivo de mapear a desertificação em uma reserva natural da Mongólia e avaliar a mudança das coberturas da terra e processos de desertificação utilizando o NDVI, o Índice de Tamanho do Grão do Topsoil – TGSi e o albedo da superfície terrestre a partir de imagens Landsat TM e ETM como indicadores para representar as condições da área de estudo a partir da biomassa da vegetação, os padrões da paisagem e a micrometeorologia. O TGSi é calculado a partir da equação (1):

$$TGSi = \frac{(R_{b3} - B_{b1})}{(R_{b3} + B_{b1} + G_{b2})} \quad (1)$$

Em que: **R**, **G** e **B** correspondem às bandas do vermelho, azul e verde, respectivamente.

Os indicadores foram calculados a partir do método da árvore de decisão e analisar esses indicadores por correlações. O NDVI apresenta pouca correlação com o TGSi e o albedo, enquanto o TGSi e o albedo apresentam correlação muito alta. Isso corresponde às

áreas com alto conteúdo de areia na superfície ou baixo teor de argilas e siltitos. (LAMCHIN *et al.*, 2016), concluem que as áreas com muita alta desertificação foram aumentando, pois naquelas áreas com pouca ou baixa desertificação diminuíram significativamente, enquanto as áreas com desertificação média e alta não mudaram significativamente.

3.2.2 Sensor MODIS

O Sensor MODIS é considerado como um dos mais completos em operação a bordo do Sistema de Observação da Terra da NASA (EOS - *Earth Observing Systems*) e dos satélites TERRA e AQUA, com lançamentos em dezembro de 1999 e em maio de 2002 respectivamente e a órbita do satélite em relação à Terra é de aproximadamente 705 km. O sensor MODIS permite obter imagens da superfície da Terra com uma Largura de 2300 km. em 36 bandas espectrais, três resoluções espaciais; 250 m (banda 1 e 2), 500 m (bandas 3 - 7), 1 km (bandas 8 - 36), a resolução temporal é de 1 dia, a coleta das imagens acontece cada 16 dias e a resolução radiométrica é de 12 bits (4096 níveis) (BELTRÁN, 2014; MOREIRA, 2016).

O período de cobertura das imagens é de uma disponibilidade maior de 16 anos, o que faz que este tipo de sensor forneça informação suficiente para realizar diferentes tipos de análise em série de tempo em relação aos processos de transformação ambiental e as dinâmicas do uso e cobertura do solo (MAS, 2011).

Uma limitante para a seleção das imagens para este tipo de estudos é a presença de nuvens na área a analisar, neste caso, a região do Vale de Villa de Leyva apresenta uma cobertura de nuvens média a alta entre os meses de setembro e junho, o que restringe o uso de outras fontes de informação com a continuidade necessária para estes tipos de análises.

Nesta temática da análise ambiental o sensor MODIS tem sido muito utilizado para a geração de índices de degradação, como por exemplo, os processos de desertificação. Portanto, para uma avaliação quantitativa dos processos de desertificação tem sido um tema importante que é de ajuda para a prevenção a nível global, como também em propostas para recuperação de áreas degradadas (WANG, J. *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2010).

Devido à limitação e a acessibilidade dos dados, diferentes grupos de pesquisadores fazem uma seleção de um sistema de indicadores e métodos para a avaliação da desertificação usando ferramentas do sensoriamento remoto e modelagem espacial nos últimos anos. Embora a avaliação quantitativa dos processos de desertificação baseada no Sensoriamento Remoto tenha tido sucesso, a maioria deste tipo de pesquisas foram feitas em diferentes regiões a uma escala pequena, o que pode não refletir a heterogeneidade espectral da superfície da Terra e apoiar as avaliações quantitativas em regiões de maior tamanho (XU *et al.*, 2012).

Da mesma maneira, BRAVO PEÑA *et al.*, 2013 estudaram o comportamento do índice de vegetação EVI em cinco tipos diferentes de vegetação a partir de uma serie temporal entre os anos 2000 e 2013, obtida pelo sensor MODIS. Os tipos de vegetação analisados foram floresta nativa, floresta secundaria, floresta secundaria misturada, arbustos xerofíticos do deserto de Sonora e arbustos xerofíticos do deserto de Chihuahua, no México. Os pesquisadores empregaram uma análise de tendências em séries de tempo com o teste de Mann-Kendall e os resultados obtidos são compostos por: os valores da média do EVI, máximos e mínimos por cada tipo de cobertura; o comportamento típico, anual do EVI por cada tipo de cobertura e as tendências do EVI por cobertura em toda a série temporal. O resultado obtido foi que os três principais tipos de cobertura de floresta apresentam tendência positiva de aumento do EVI, por enquanto as duas coberturas de arbustos xerofíticos dos desertos de Sonora e Chihuahua apresentam tendência negativa com esse índice de vegetação, o que faz pensar na possibilidade de aumento das áreas de deserto a futuro, pois a precipitação diminui com o tempo dificultando a regeneração do solo.

3.2.2.1 Níveis de Processamento

Os produtos das imagens MODIS encontram-se divididos em cinco níveis, de (0 a 4) em função do grau de processamento feito.

- Nível 0: Contém os dados brutos, sem nenhum tipo de processamento prévio nas imagens, só alguns atributos de comunicação entre a estação e o satélite foram eliminados.

- Nível L1: São dados de geolocalização, identificado como (MOD03), tem informação sobre: coordenadas, elevação do terreno, máscara de terra e água, ângulo de elevação, zênite e azimute do satélite e do sol.
- Nível 1A: Contém os produtos utilizados para a geolocalização, calibração e processamento. Também contém os níveis de radiância (MOD01) das 36 bandas espectrais, coeficiente de calibração radiométrica e correção geométrica.
- Nível 1B: São os produtos que contém as radiâncias calibradas e com a geolocalização (MOD02) para as 36 bandas geradas pelo nível 1^a. É, portanto, uma imagem corrigida radiometricamente e calibrada em unidades físicas.
- Nível 2: São produtos que contém variáveis geofísicas projetadas como uma grade (Nível 2) L2G. Os produtos do nível L2 são gerados a partir do produto L1B aplicando correções atmosféricas.
- **Nível 3:** Os produtos deste nível são reamostrados espacial e temporalmente para dar uma estimativa das variáveis geofísicas em forma de refletância da superfície (MOD09), Índices de vegetação, o que vai ser usado neste trabalho (MOD13), temperatura e emissividade da superfície da Terra (MOD11) e pontos de calor e incêndios (MOD14).
- Nível 4: São produtos gerados pela incorporação de dados MODIS em modelos para estimar variáveis geofísicas com mapeamento. Alguns exemplos deste produto são: índice da área foliar – fração de radiação ativa fotossintética (MOD15), coberturas do solo (MOD16), produção primária (MOD17)(LATORRE *et al.*, 2003; MAS, 2011).

3.2.2.2 Produto MOD13

O produto MOD13 fornece índices de vegetação para realizar diferentes tipos de comparações espaciais em relação à pigmentação verde da vegetação que é a clorofila. Esses índices podem ser usados para o monitoramento da atividade fotossintética das plantas, análises e detecção de mudanças, como também análises de processos de degradação ambiental e a fenologia da vegetação (BELTRÁN, 2014; MOREIRA, 2016).

Para gerar o produto MOD13 é utilizado um algoritmo para o cálculo da refletância da superfície do produto MOD09, por meio do módulo MOD_PR09.exe o qual corrige os efeitos dos gases atmosféricos e aerossóis em cada resolução espacial disponível do nível 1B (1 km, 500 m. e 250 m), o que fornece uma estimativa da refletância espectral da superfície para cada banda, já que seria medida ao nível do solo se não existe dispersão ou absorção atmosférica.

Os dados da radiância calibrada são escalados e divididos pelo cosseno do ângulo do zênite solar, o que dá como resultado um valor X da parte superior da atmosfera. Os parâmetros relacionados com a dispersão e absorção atmosférica são calculados por interpolação a partir de tabelas de pesquisa previamente calculadas e os dados da parte superior da atmosfera são aplicados (vapor de água e a espessura óptica do aerossol) (VERMOTE, 2011).

A espessura óptica do aerossol é estimada comparando os valores reais da atmosfera superior corrigida com os valores modelados da parte superior com quantidades conhecidas da espessura óptica. A espessura óptica derivada é usada numa segunda etapa de correção atmosférica.

O rendimento do algoritmo da correção atmosférica é degradada a medida que a visibilidade e os ângulos zenitais solares são maiores e a espessura óptica do aerossol aumenta. O algoritmo também é menos preciso para as bandas com comprimentos de onda baixos. O nível de precisão da correção atmosférica comum é $\pm (0.005 + 0.05 * \text{refletância})$ sob condições favoráveis (níveis de aerossol pouco altos). A tabela de pesquisa utilizada no algoritmo de correção atmosférica assume limites superiores a 5,0 para a espessura óptica do aerossol e de 75° para os ângulos zenitais solares (VERMOTE, 2011).

O produto MOD13 tem uma resolução temporal tanto de 1, 16 dias, como mensal (os produtos MOD13A3 e o 13C2), Tabela 4 (MAS, 2011).

Tabela 4: Produtos dos índices de vegetação do sensor MODIS (MOD13)

PRODUTO	MOD13Q1	MOD13A1	MOD13A2	MOD13A3	MOD13C1	MOD13C2
PLATAFORMA	TERRA/AQUA	TERRA/AQUA	TERRA/AQUA	TERRA/AQUA	TERRA/AQUA	TERRA/AQUA
RESOLUÇÃO ESPACIAL	250 MTS	500 MTS	1 Km	1 Km	0,05°	0,05°
RESOLUÇÃO TEMPORAL	1 DIA	1 DIA	1 DIA	MENSAL	1 DIA	MENSAL
TAMANHO DO ARQUIVO	5 - 270 MB	2-77 MB	1-22 MB	0,15-20 MB	35,5 MB	19 MB
NUMERO DE CAMADAS	12	12	12	11	13	13
DATA DE INICIO DA PRODUÇÃO - TERRA E AQUA	24/02/2000 14/07/2002	24/02/2000 14/07/2002	24/02/2000 14/07/2002	18/02/2000 1/07/2002	18/02/2000 1/07/2002	18/02/2000 1/07/2002

Fonte: Adaptado do: (MAS, 2011)

Neste estudo foi usado o produto MOD13Q1 que contem os índices de vegetação mencionados.

3.2.3 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

A análise da dinâmica da vegetação e a detecção das mudanças dos padrões da distribuição são muito importantes na hora de avaliar os recursos naturais da superfície terrestre, esta análise pode ser feita com informações fornecidas por diferentes satélites calculando Índices de Vegetação (IV). Com os IV é possível monitorar aspectos como a qualidade da vegetação, a evolução desta, e analisar as variações que ela tem devido a fatores como fenômenos naturais e a intervenção humana (CASTRO AVARIA *et al.*, 2014).

Os índices de vegetação funcionam devido à interação da vegetação e a energia eletromagnética nas regiões do vermelho e infravermelho no espectro eletromagnético. Com base nas diferenças dos valores da refletância entre a banda do vermelho, que tem pouca refletância pela absorção destes comprimentos de onda pela clorofila e a banda do

infravermelho próximo, é possível reconhecer os pixels que tem vegetação e aqueles que não têm (CASTRO AVARIA *et al.*, 2014).

O índice mais empregado para a análise da dinâmica da vegetação é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) que é gerado a partir da equação (2).

$$NDVI = \frac{\rho_{IV\ PROXIMO} - \rho_{VERMELHO}}{\rho_{IV\ PROXIMO} + \rho_{VERMELHO}} \quad (2)$$

A escala do índice de vegetação é entre 1 e -1, com o valor Zero representando o valor aproximado onde começa a ausência da vegetação os valores negativos representam lugares sem vegetação (RUEDA CALIER *et al.*, 2015).

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI) é outro dos índices mais utilizados para fazer estudos de monitoramento da vegetação, que foi desenvolvido para aperfeiçoar a representação da vegetação com alta sensibilidade em regiões de alto conteúdo de biomassa, reduzindo ao mínimo as imperfeições causadas por influências atmosféricas (HUETE *et al.*, 2002). O EVI é obtido pela equação (3):

$$EVI = G \frac{\rho_{IV\ PROX} - \rho_{VERMELHO}}{\rho_{IV\ PROX} + C_1 \times \rho_{VERMELHO} - C_2 \times \rho_{AZUL} + L} \quad (3)$$

Em que: ρ é cada uma das bandas em suas respectivas regiões no espectro eletromagnético, L é o fator de ajuste do fundo do dossel que aborda o $\rho_{IV\ PROX}$ diferencial não linear e a transferência radiante vermelha, C_1 e C_2 são os pesos de resistência do aerossol nas bandas do vermelho e do azul, o ρ_{AZUL} , $\rho_{VERMELHO}$ e o $\rho_{IV\ PROX}$ representam os comprimentos de onda no azul (0,45 – 0,52 μm), vermelho (0,6 – 0,7 μm) e infravermelho (0,7 – 1,1 μm). Devido a que a influencia de fundo do NDVI diminui em relação com o aumento no conteúdo dos aerossóis atmosféricos e que com uma visibilidade horizontal de

5 km., as diferenças existentes viram quase nulas, por isso a criação de estes fatores de correção no EVI, os quais contem os seguintes valores: $C_1=6$, $C_2 =7,5$ e $L =1$ e $G = 2,5$ (HUETE *et al.*, 2002; MAS, 2011).

Nas áreas que possuem ecossistemas secos ou áridos, o monitoramento dos processos de desertificação por meio da identificação da cobertura vegetal analisando índices de vegetação, não é uma tarefa tão simples com apoio das ferramentas do sensoriamento remoto. Os índices de vegetação podem mostrar variações em séries temporais que não necessariamente sejam processos de desertificação e sim simples variações na vegetação como o estado fenológico da vegetação, a sua densidade e a presença de nutrientes nas plantas e no solo (FAGUA e POSADA, 2013).

A fenologia é a ciência que estuda os processos biológicos de forma periódica e a sua relação com as mudanças climáticas o do estado do tempo. O clima é um fator determinante da distribuição da vegetação, além de atuar de forma direta sobre a vegetação, também tem influencia nos processos de formação dos solos e na fisiografia e na distribuição dos microorganismos e nos animais (VÁZQUEZ *et al.*, 2013).

A fenologia da vegetação tem relação com os índices NDVI e EVI, por isso é possível analisar este aspecto por series de tempo a partir de imagens obtidas por sensoriamento remoto assim estimar parâmetros biológicos que caracterizam as diferentes etapas dos ciclos fenológicos. Um parâmetro utilizado como indicador das mudanças fenológicas da vegetação é o valor da radiança das comunidades vegetais, o qual pode mudar entre uma comunidade e outra, dependendo da época do ano, como também da composição florística de cada uma delas (HORI OCHOA, 1998).

A caracterização espectral das coberturas vegetais pode apresentar dificuldades devido a diversos fatores que influem na energia obtida pelo sensor. A refletância própria da folha é o principal fator pelas diferenças no seu estado fenológico, forma e conteúdo de umidade. Também têm que ser consideradas as características morfológicas das plantas, altura, grau de cobertura no solo porque podem gerar mudanças no comportamento da refletância da vegetação.

Outro componente da vegetação analisado por médio dos índices de vegetação é o Índice de área foliar - IAF, o qual é definido como uma variável para descrever a produtividade e a dinâmica dos ecossistemas florestais como também é um indicador do estado de saúde e desenvolvimento do dossel. Em relação aos índices de vegetação NDVI e o EVI, o NDVI é mais sensível à clorofila enquanto o EVI apresenta maior resposta às variações estruturais do dossel, incluindo o Índice de área foliar, tipo de dossel e a fisionomia das plantas (GAO *et al.*, 2000).

A refletância que possuem as coberturas vegetais permite determinar aspectos como as mudanças no uso do solo ou a atividade fotosintética delas, pois estes comportamentos não se apresentam de maneira isolada na natureza. O monitoramento é feito para massas vegetais, não só para uma folha. Neste sentido, o grau de influencia do solo (proporção folhas – solo) é um parâmetro importante que pode afetar a observação do sensor, a qual é estimada em função da área com cobertura verde no solo. É por isso que o calculo do índice de área foliar tem relevância, pois relaciona a área de cobertura do solo de forma direta (MORA, 2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os dados necessários para o desenvolvimento deste estudo são compostos por bases digitais em formato vetorial e arquivos em formato GRID, a ser detalhados a seguir:

- Dados de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI), fornecidos pelo produto MOD13Q1 do Sensor MODIS. Estes dados dos índices de vegetação são escolhidos pela boa resolução temporal em conjunto com a disponibilidade dos dados, ótimos para realizar análises em séries temporais;
- Dados do NDVI e EVI do programa Landsat do dezembro de 2016 gerados a partir do produto “Landsat 8 Surface Reflectance”, com o fim de comparar e validar os resultados obtidos a partir das análises dos produtos do sensor MODIS para essa data. Os índices de vegetação contêm as correções atmosféricas e são produtos fornecidos diretamente pela NASA. Esta informação conta com uma resolução espacial de 30 m. e com formato GeoTIFF.
- Modelo Digital de Elevação (DEM) disponibilizado pela NASA, especificamente o produto adquirido foi o “Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global”. Este produto fornece uma cobertura de nível mundial de dados com vazios corrigidos, estes dados têm uma resolução de um arco segundo (30 metros) e fornecem uma distribuição aberta de estes conjuntos de dados globais de alta resolução. Alguns conjuntos de dados ainda podem conter vazios. No caso da região do vale de Villa de Leyva existem dados disponíveis com estas características. O número do produto é SRTM1N05W074V3.
- Bases vetoriais em formato *shapefile* com as seguintes informações temáticas: cartografia base, com escala 1:100.000, zoneamento da erosão, ameaça por salinização e tendências de desertificação, elaborados pelas instituições IDEAM, IGAC, MAVDT. Esses dados são fornecidos pelo Sistema de Informação Geográfica para o Ordenamento Territorial – SIGOT, do Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. O mapa de salinização foi elaborado pelas instituições mencionadas no ano

2005 com uma escala de 1:500.000, bastante geral para a área de estudo. O mapa de tendência a desertificação foi elaborado no ano 2010, com uma escala de 1:500.000, e o mapa de zoneamento por erosão foi elaborado nesse mesmo ano, com uma escala de 1:100.000. As camadas vetoriais foram obtidas no site do SIGOT: sigotn.igac.gov.co/

4.1.1 Dados de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

Para o desenvolvimento deste estudo, foram adquiridas as imagens do sensor MODIS em uma série temporal entre os anos 2001 e 2016. Do sensor MODIS o produto utilizado foi o MOD13Q1, que contém os Índices de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Melhorado (EVI), com uma resolução temporal de um (1) dia e resolução espacial de 250m e com imagens geradas cada 16 dias. Estes dados coletados se encontram armazenados em formato HDF (Formato de Dados Hierárquicos) (MELÉNDEZ PASTOR *et al.*, 2009). As imagens foram obtidas do site do USGS, na plataforma “Earth Explorer”: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

4.1.2 Imagem SRTM ou Modelo Digital de Elevação (DEM)

A imagem SRTM, disponibilizada pela NASA, é produto de uma missão no espaço exterior para obter modelos digitais de elevação do terreno a partir de um Radar de Abertura Sintética (SAR). As imagens geradas pela missão contam com uma resolução espacial de 30m e possuem dados de altitude que permitem gerar um modelo digital de elevação em 3D. A imagem SRTM foi obtida no site: <https://reverb.echo.nasa.gov/> e na Figura 16 são apresentados os dados Landsat adequados aos dados SRTM:

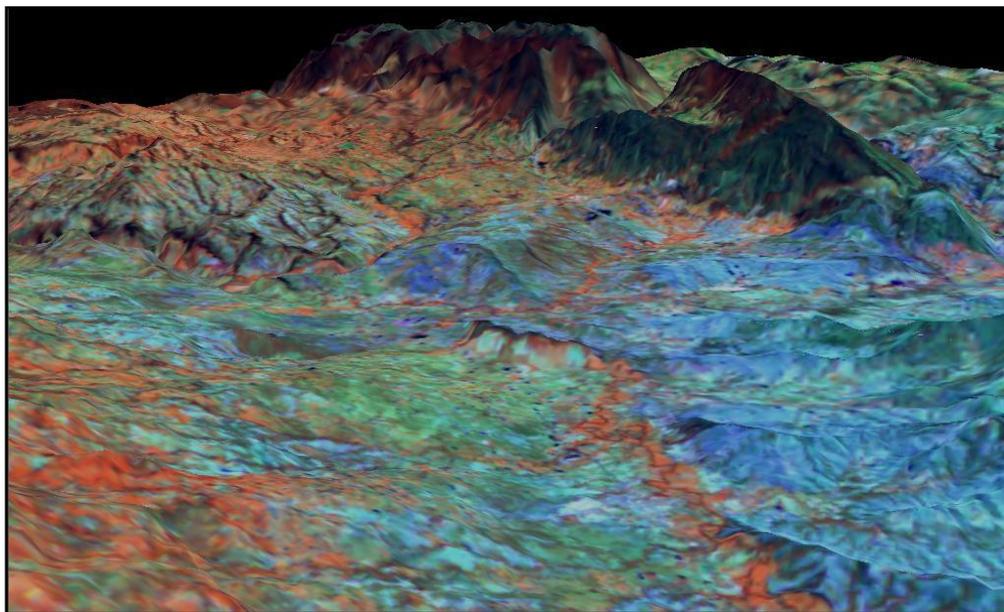


Figura 16: Imagem Landsat ETM, composição colorida falsa RGB-453, sobreposta a uma imagem SRTM em 3D

Segundo o MARTÍNEZ *et al.*, 2004, num estudo elaborado na Espanha, existem diferenças significativas na distribuição da vegetação, em relação com a sazonalidade, combinando variáveis topográficas (elevação, radiação incidente, declividade e curvatura do terreno). O principal fator biofísico que regula a distribuição da vegetação é a temperatura, e no caso da Colômbia que não existe sazonalidade, a temperatura é regulada pela altitude como também a dinâmica vegetal é regulada com os períodos de chuva e seca.

4.1.3 Camadas vetoriais: Erosão, Salinização, Tendências a Desertificação

As camadas vetoriais adquiridas para a análise dos processos de degradação ambiental no Vale de Villa de Leyva correspondem às temáticas de Erosão, Salinização e Tendência a Desertificação. Estes temas digitais são produto dos documentos dos protocolos de degradação ambiental por estas causas, os quais foram gerados pelo Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) e o Ministério de Médio Ambiente, Habitat e Desenvolvimento Territorial em 2010. As escalas em que foram elaborados estes temas digitais são de 1:500.000 para os dados de salinização e tendência a desertificação, e de 1:100.000 para os dados de erosão.

4.2 Métodos

Os procedimentos que foram realizados neste trabalho se encontram detalhados de acordo com o fluxograma da Figura 17:

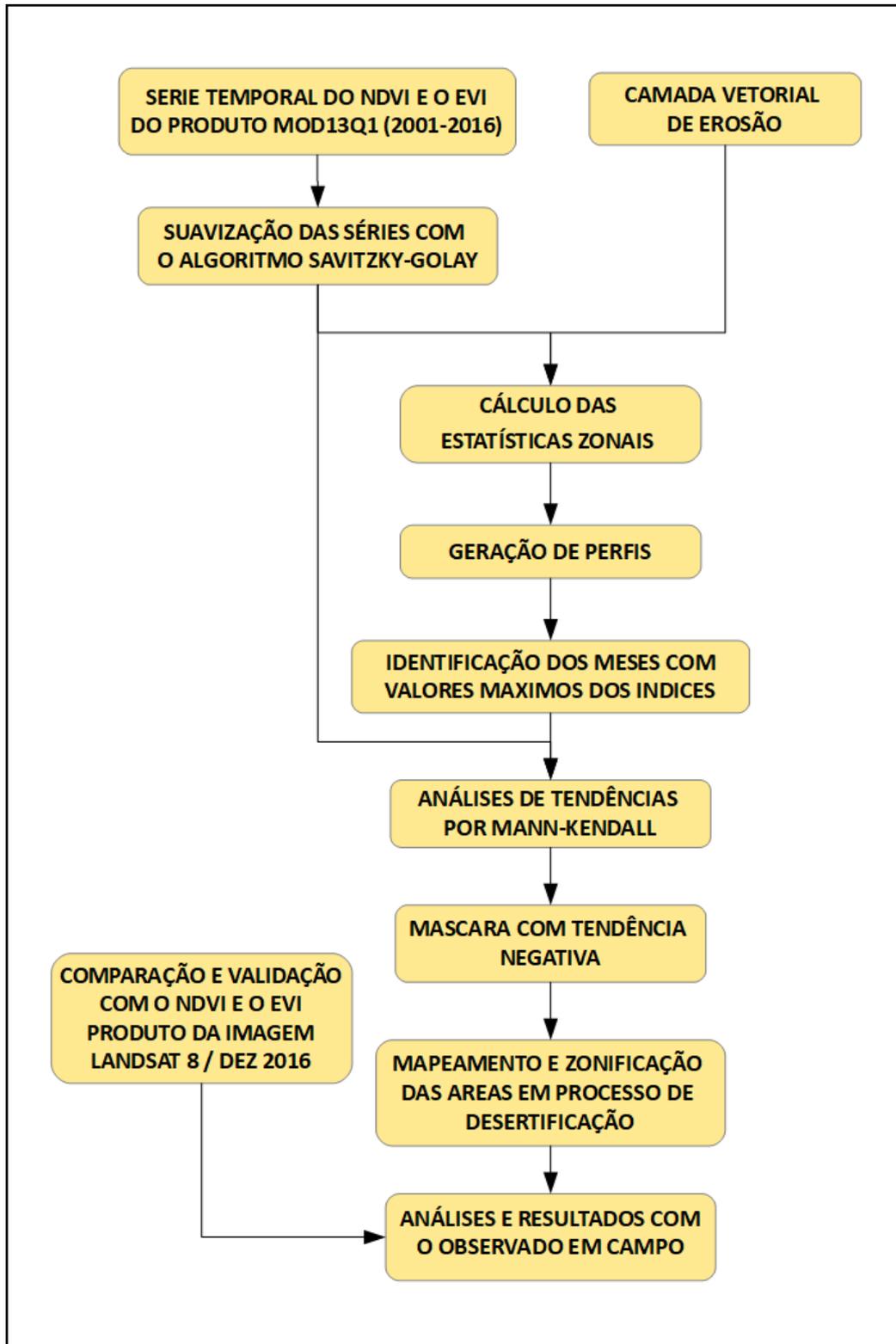


Figura 17: Fluxograma dos procedimentos metodológicos

4.2.1 Geração do limite da bacia hidrográfica do Vale de Villa de Leyva

É de grande importância para estabelecer como unidade de análise a bacia hidrográfica, pois esta unidade permite um ordenamento do território em torno da preservação deste líquido essencial (PETTA et al., 2013). A bacia hidrográfica como unidade de análise é adequada porque considera fatores de grande importância na época de estudos e interpretações de conceituar e identificar a dinâmica que variam de fisiografia do território, até as questões socioculturais da região (BENAVIDES MORA *et al.*, 2009). A visão da interpretação da dinâmica da transformação do território pela interação dos componentes presentes no ambiente ao nível da bacia hidrográfica fornece elementos para a análise das relações entre os padrões de ocupação do território e os processos de transformação ambiental, elemento chave em estudos que incluem as alterações ambientais como tema central (CHEN *et al.*, 2009; XIAOFENG *et al.*, 2009).

A partir da imagem SRTM foi gerado o limite das bacias hidrográficas da área geral, e selecionada a bacia hidrográfica que compreende a área de estudo e que delimita o Vale de Villa de Leyva. A bacia hidrográfica foi gerada com o módulo Hydrology do software ArcGIS, o qual permite: o pontos de entrada e saída da rede hidrográfica, encher vazios para corrigir imperfeições dos dados SRTM, a acumulação do fluxo da água e finalmente delimitar a bacia hidrográfica baseado na topografia e nas correntes que identifica o módulo.

Baseados no limite da bacia hidrográfica foram realizadas as operações de extração por máscara dos índices de vegetação gerados a partir das imagens MODIS. Também foram realizadas operações de interseção com as camadas digitais de erosão, salinização e tendência à desertificação. A Figura 18 apresenta a imagem SRTM com a bacia hidrográfica delimitando a área de estudo.

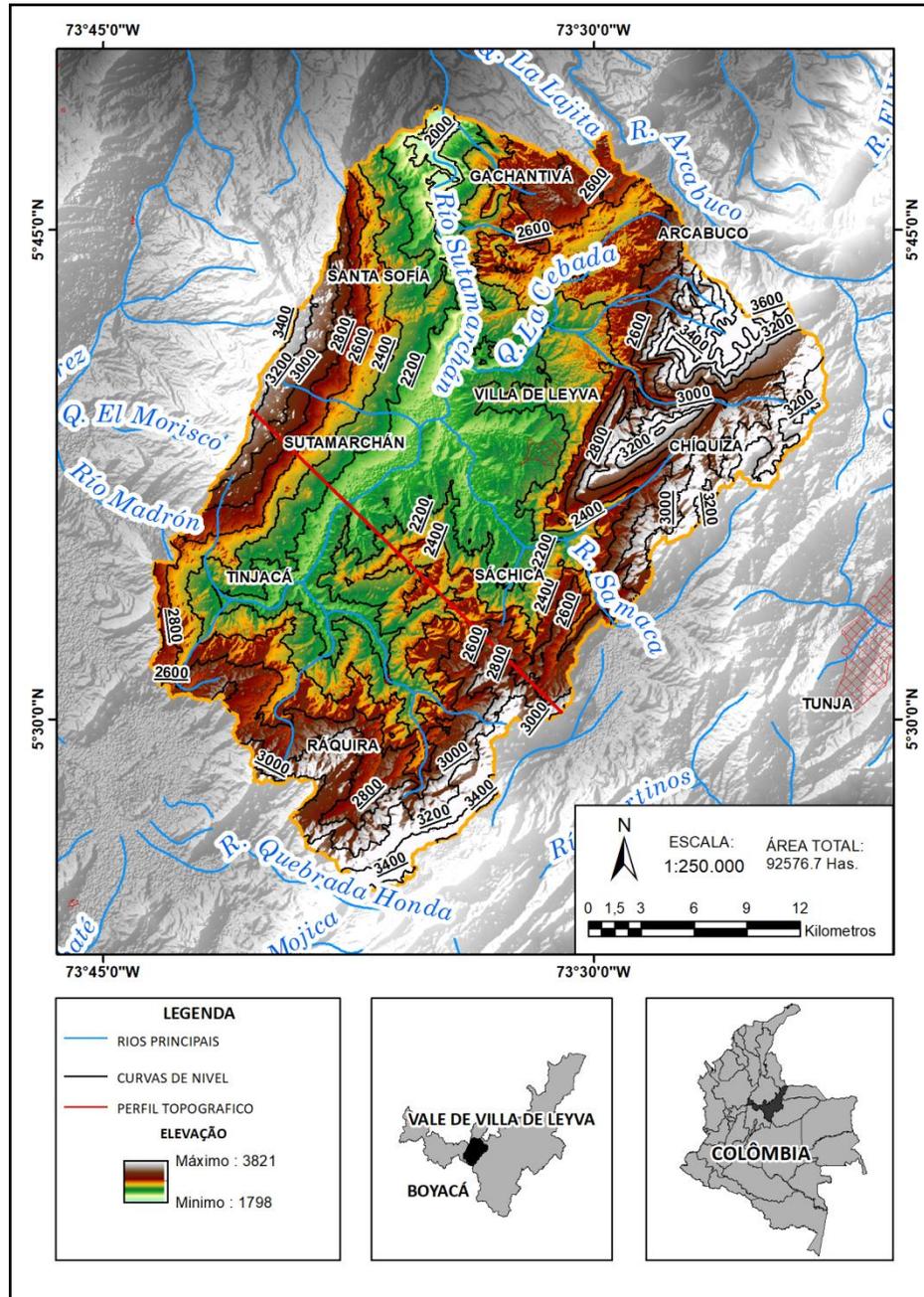


Figura 18: Extração da Imagem SRTM e mapa altimétrico da bacia hidrográfica.

Interpretando a imagem SRTM de acordo com o perfil traçado, o relevo do Vale de Villa de Leyva é ondulado na maioria, com declividades moderadas a fortes e as alturas oscilam entre os 2.000 a 3.800 metros acima do nível do mar. Na Figura 19 é vista a panorâmica seguindo o trajeto do perfil traçado no mapa e na Figura 20 pode ser observado o perfil gerado a partir da imagem SRTM.



Figura 19: Panorâmica do Vale de Villa de Leyva de acordo com o perfil topográfico

Fonte: Trabalho de campo, 2017.

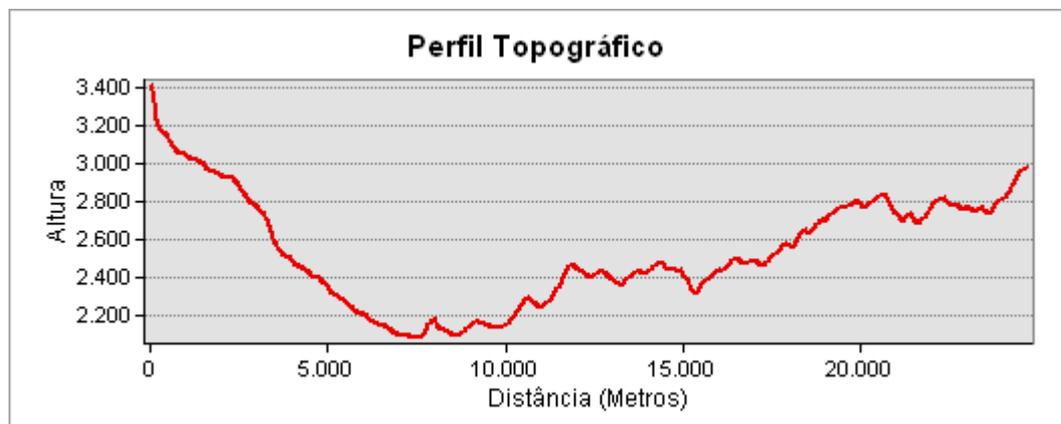


Figura 20: Perfil topográfico do Vale de Villa de Leyva.

4.2.2 Geração de perfis dos índices de vegetação das imagens MODIS

Para processar os arquivos que contém os índices de vegetação NDVI e EVI, foi criado um módulo no software ArcGIS para fazer a extração destes arquivos do produto MODIS MOD13Q1. Logo da extração da informação dos Índices de Vegetação, se realizaram operações de extração por máscara destes temas digitais com o limite da bacia hidrográfica do Vale de Villa de Leyva. Foram coletadas 368 imagens das quais foram analisadas, mediante a elaboração de perfis, 96 imagens que correspondem com todos os meses de maio e dezembro entre o ano 2001 e 2016. Na etapa das análises do produto MODIS MOD13Q1 para os índices de vegetação NDVI e o EVI, observou-se que as imagens apresentam em alguns pontos erro ou ausência de informação, o qual foi corrigido empregando o algoritmo Savitzky-Golay gerando novas imagens filtradas (OROZCO FILHO, 2015).

O método de interpolação do algoritmo Savitzky-Golay consiste em calcular amostra por amostra com base numa regressão polinomial. Este tipo de filtro está adaptado às variações das frequências da amostra e conserva as características da distribuição inicial nos valores máximos e mínimos, como também a largura e a altura dos picos quando os dados contem erros ou ausência de informação (VÁZQUEZ *et al.*, 2013).

4.2.3 Áreas afetadas por processos de erosão, salinização e tendência à desertificação

Com as bases vetoriais de erosão, salinização e tendência à desertificação, foram feitas operações de interseção com o limite da bacia hidrográfica no Vale de Villa de Leyva, para identificar as áreas onde ocorrem de maneira mais intensiva os processos, e foi feita uma sobreposição destas camadas com o fim de observar se existem áreas nas que se apresentam estes processos de maneira simultânea. Como existe pouca coincidência e os temas digitais foram elaborados em diferentes escalas, determinar áreas com base nas camadas de tendência à desertificação e com ameaça por salinização resultou pouco pratico e com risco de incorrer em erros nas análises.

Assim, foram escolhidos os polígonos para a elaboração de perfis comparativos com base na camada vetorial de erosão, porque é a mais adequada em termos de escala e precisão para fazer este tipo de cálculos, isso com a finalidade de analisar o NDVI e o EVI e

assim determinar focos com os valores mais baixos junto com a sua distribuição. Os três polígonos escolhidos foram definidos a partir das seguintes feições: áreas com vegetação com processos erosivos baixos ou nulos, áreas com vegetação pouca ou dispersa com processos erosivos médios a altos e áreas sem vegetação com processos erosivos médios a altos.

4.2.4 Operações estatísticas zonais

As estatísticas zonais são um procedimento, no qual a partir de um cruzamento de uma camada em formato vetorial com uma camada em formato raster, é possível calcular o valor médio, desvio padrão, máximo, mínimo, entre outras estatísticas da imagem raster em relação aos polígonos de entrada da camada vetorial, sendo o valor da estatística atribuído para a área total desse polígono (ESCALANTE e GRANDE, 2011).

Neste caso, a estatística utilizada foi a média dos valores dos índices de vegetação, tanto do NDVI como do EVI, de cada imagem sobre os três polígonos da camada vetorial de erosão identificados previamente. As operações de estatísticas zonais foram realizadas para quantificar a presença, ausência e a mudança nos índices de vegetação por cada grau de erosão que existe na área de estudo, com o fim de identificar as áreas onde acontecem de maneira mais dinâmica estes processos, as tendências de mudança e obter assim as áreas mais suscetíveis a sofrer degradação ambiental por desertificação.

4.2.5 Geração do mapa de tendências e mudanças do NDVI e EVI

Para gerar o mapa de tendências de mudanças dos índices de vegetação NDVI e EVI foi implementado o modelo de tendências de Mann-Kendall. Este modelo tem sido usado amplamente em estudos que envolvem a temática ambiental, já que tem a vantagem de analisar dados sem importar a distribuição, pois é um modelo não linear. Este modelo tem sido usado para identificar tendências em temas climáticos, devido à consistência que este apresenta. O modelo utiliza estimadores não paramétricos nos quais a frequência é medida para quantificar a tendência como mudança de unidade no tempo e não tem em conta uma tendência linear na medida do processo (MÉNDEZ GONZÁLEZ *et al.*, 2008).

Como os valores negativos de Mann-Kendall indicam que a tendência dos índices foi diminuir durante o período de análise, podem ser então identificadas às áreas que estão em processos de desertificação ao relacionar Mann-Kendall com os valores dos índices do último ano (MÉNDEZ GONZÁLEZ *et al.*, 2008). Quando a tendência for negativa e os valores dos índices no último ano forem baixos, mas acima dos valores do “deserto”, infere-se que essas áreas apresentaram processos de degradação durante o período de análise e que ao ter valores de índices que atualmente estão próximos aos valores do “deserto”, são áreas em processos de desertificação. Portanto, primeiro foi gerada uma máscara com os valores negativos de Kendall para cada índice de vegetação, tanto para maio como para dezembro, obtendo assim quatro mapas finais, dois do NDVI e dois do EVI. Posteriormente, para cada máscara foi feita uma sobreposição dos respectivos índices de vegetação tanto de maio como de dezembro de 2016, assim, por exemplo, para o Kendall de NDVI de maio a sobreposição foi feita com o NDVI de maio de 2016 para identificar as áreas com ameaça de degradação, e assim por diante com as outras imagens de Kendall.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa serão apresentados em três partes, a primeira faz referência à análise e quantificação das áreas com processos de erosão, salinização e tendência a desertificação. A segunda parte refere-se à identificação de regiões para calcular estatísticas zonais e gerar perfis de índices de vegetação com base na camada vetorial de erosão. A terceira parte trata da análise das regiões com tendência a degradação ambiental que foram identificadas com base nas estatísticas zonais e o seu processo evolutivo até a atualidade.

5.1 Análises das camadas vetoriais de erosão, salinização e tendência à desertificação

As imagens geradas de NDVI e EVI permitem observar padrões de distribuição das áreas com processos de degradação ambiental. Para fazer essa análise, foram sobrepostas às camadas digitais de erosão, salinização e tendências à desertificação. Sobrepondo essas camadas, o próximo passo foi identificar áreas em que ocorrem os processos de modo simultâneo de desertificação por erosão e salinização. É necessário esclarecer que os estudos de tendência a desertificação e degradação por salinização foram feitos em nível nacional, por tanto, as escalas dos mapas de esses dois fenômenos são muito gerais, sendo mais útil o mapa de erosão que foi feito em nível “departamental” (equivalente a estadual).

O mapa de erosão conta com informação dos tipos e intensidade deste processo na área de estudo. Segundo (IGAC; *et al.*, 2010b), na área de estudo os processos de erosão são de tipo hídrica, distribuída dentro das seguintes classes: laminar, sulcos, ravinas e voçorocas, e com todo tipo de graus ou intensidades: muito alta, alta, média, baixa, sem solo (afloramento rochoso e áreas urbanas) e áreas sem erosão (Figura 21). A quantificação das áreas por classe e intensidade encontra-se na Tabela 5.

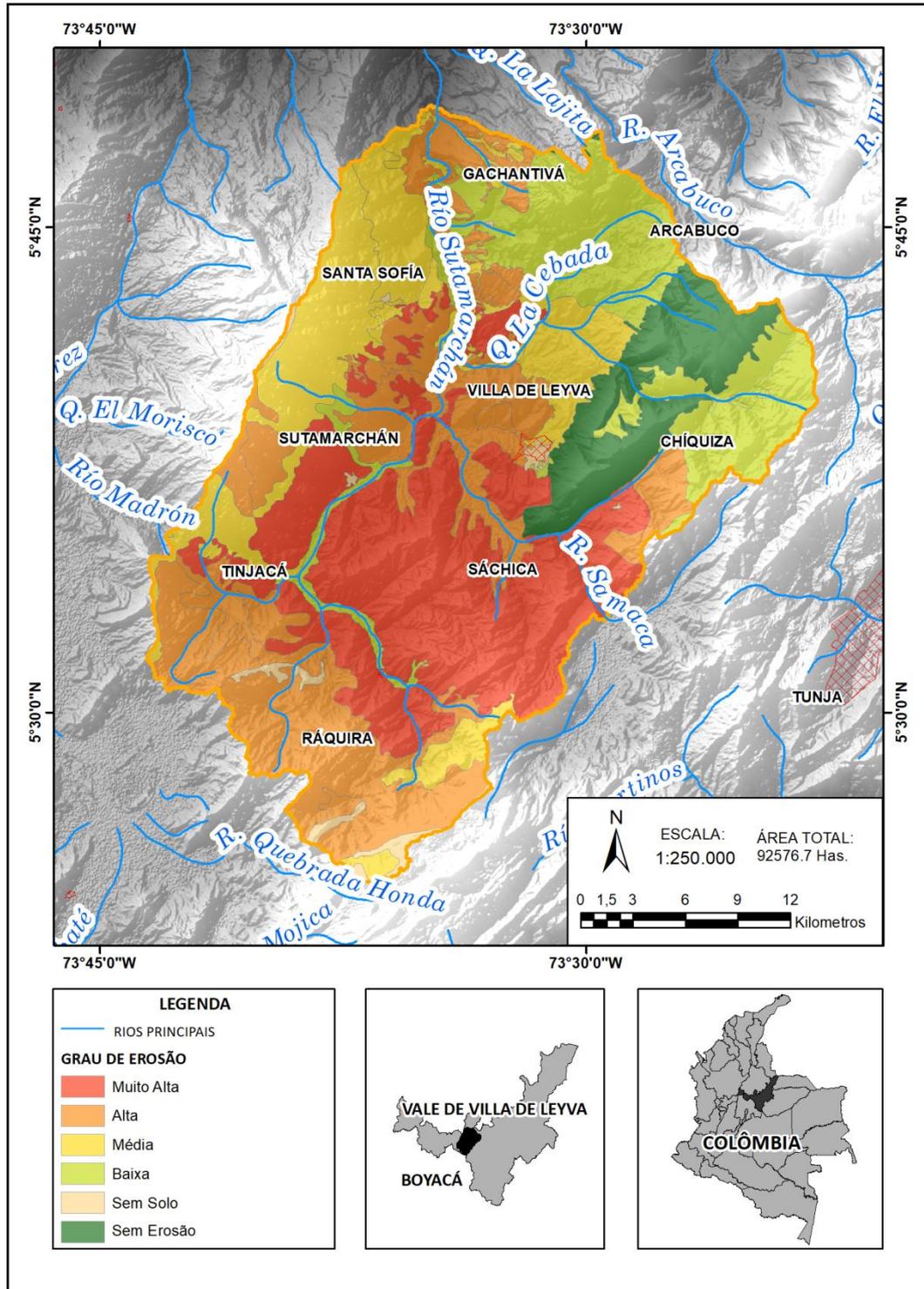


Figura 21: Mapa de erosão da área de estudo.

Fonte: SIGOT, 2010.

Tabela 5: Tipos, graus e áreas com erosão na área de estudo.

TIPO DE EROSÃO	GRAU	AREA HECTARES.	PORCENTAGEM
LAMINAR	MUITO ALTA	0	0
	ALTA	6868,01	7,42
	MÉDIA	6750,06	7,29
	BAIXA	6991,1	7,55
LAMINAR E SULCOS	MUITO ALTA	1031,4	1,11
	ALTA	16888,57	18,25
	MÉDIA	9190,31	9,93
	BAIXA	8573,83	9,26
RAVINAS E VOÇOROCAS	MUITO ALTA	24733,01	26,72
	ALTA	2570,83	2,78
	MÉDIA	146,3	0,16
	BAIXA	0	0
SEM SOLO		1204,44	1,30
SEM EROSÃO		7615,9	8,23
	TOTAL	92563,76	100

No caso do zoneamento dos processos de degradação por salinização, segundo o (IGAC; *et al.*, 2010c), na área do estudo, ocorrem processos de salinização com níveis altos e toxicidade das plantas por baixa precipitação e alta evaporação, facilitando a concentração de nutrientes. Também existe uma grande influência de depósitos salinos e de chuvas com conteúdo de sal evaporada dos oceanos. Esse processo acontece na zona central do vale de Villa de Leyva, a salinização na região acontece por diferentes fatores, mas geralmente, a salinização química é devida ao uso excessivo dos regos e fertilizantes em sistemas de agricultura intensiva. A degradação mais importante é a perda da matéria orgânica do solo, que diminui a atividade biológica impedindo uma recuperação do mesmo, conduzindo este tipo de áreas em processos de desertificação (IGAC; *et al.*, 2010c). O mapa de salinização pode ser observado na Figura 22.

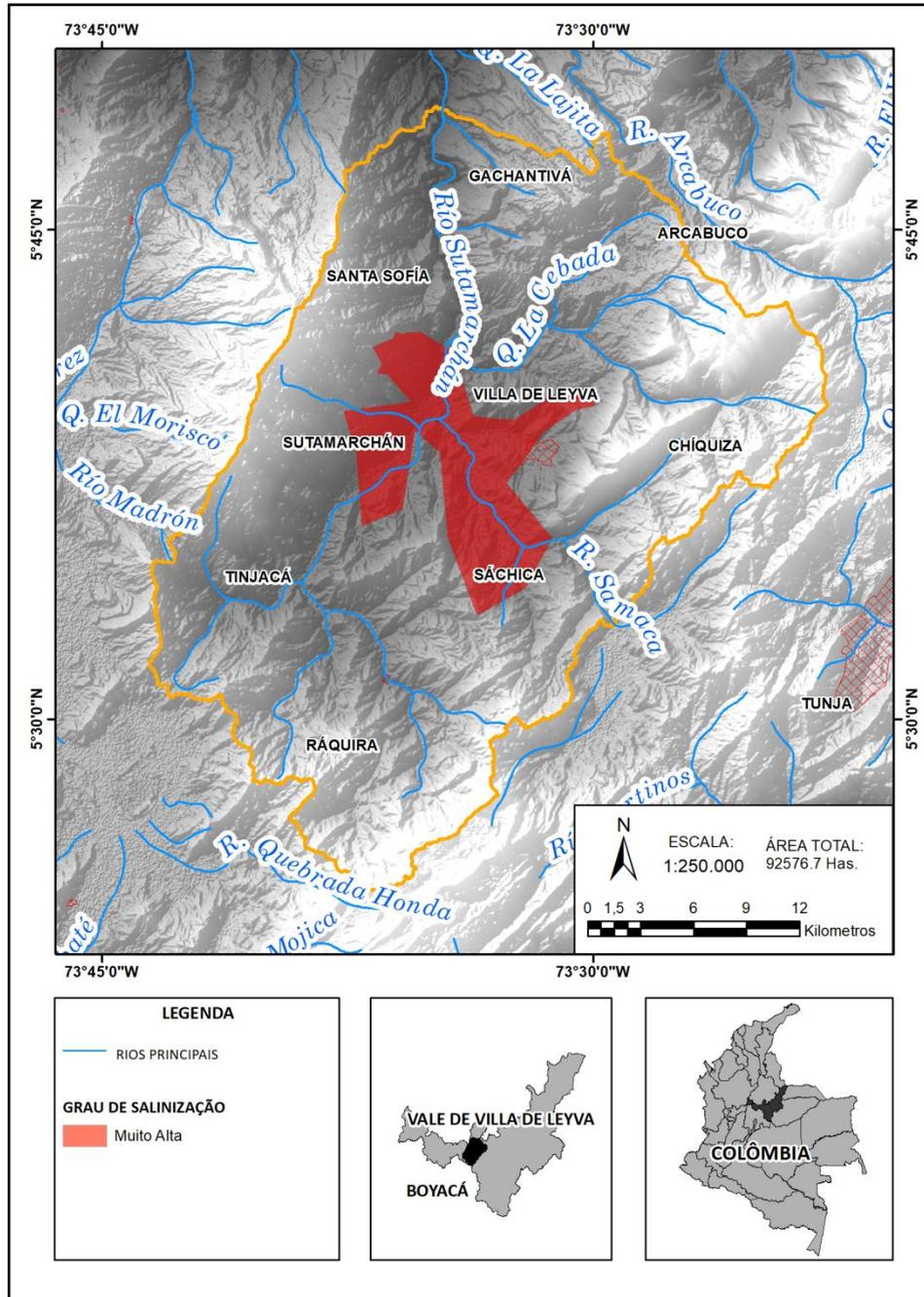


Figura 22: Mapa de salinização na área de estudo.

Fonte: IGAC, 2010.

Um exemplo deste processo que acontece em algumas áreas do Vale de Villa de Leyva pode ser observado na Figura 23.



Figura 23: Zona com processos de salinização no vale de Villa de Leyva

Fonte: IDEAM, 2010.

O mapa de tendências à desertificação contém o zoneamento por tipos de tendência que acontece na área de estudo e foi elaborado com base nas análises feitas por (IGAC; *et al.*, 2010a), a partir dos processos de erosão e salinização. A tendência alta de desertificação corresponde principalmente a terras degradadas com altos níveis de erosão e presença de sais. Note-se que na zona central do vale esta a zona com tendência alta a desertificação coincide com a zona central do vale de Villa de Leyva, onde também existe a ameaça por alta salinização e os graus de erosão muito alta.

A tendência média e baixa de desertificação faz referência a terras degradadas com nível médio e baixo de erosão respectivamente. As áreas caracterizadas como “não deserto” são aquelas que por solos, ecossistemas e clima possuem condições áridas, semi-áridas, sub-úmidas a secas, não apresentam degradação por erosão nem salinização (COGOLLOS HERNÁNDEZ e PRIETO GUTIERREZ, 2004). As áreas “sem desertificação” são aquelas sem indícios de tendências à desertificação.

O mapa apresenta uma área denominada “afloramento rochoso” que ocupa a maior extensão, mas onde não existe uma tendência à desertificação. Estes afloramentos resultam de um processo através do tempo e não obedece a uma dinâmica de transformação atual como acontece nas demais áreas com tendência a desertificação. Esta área de afloramento rochoso coincide com o zoneamento de degradação por erosão onde se encontra a zona com erosão com uma intensidade muito alta de ravinas e voçorocas, chegando ao ponto de

que a rocha mãe fica exposta numa grande parte de esta área (Figura 24) (CAMACHO *et al.*, 1995). A quantificação das áreas segundo os graus de desertificação pode ser observada na Tabela 6.

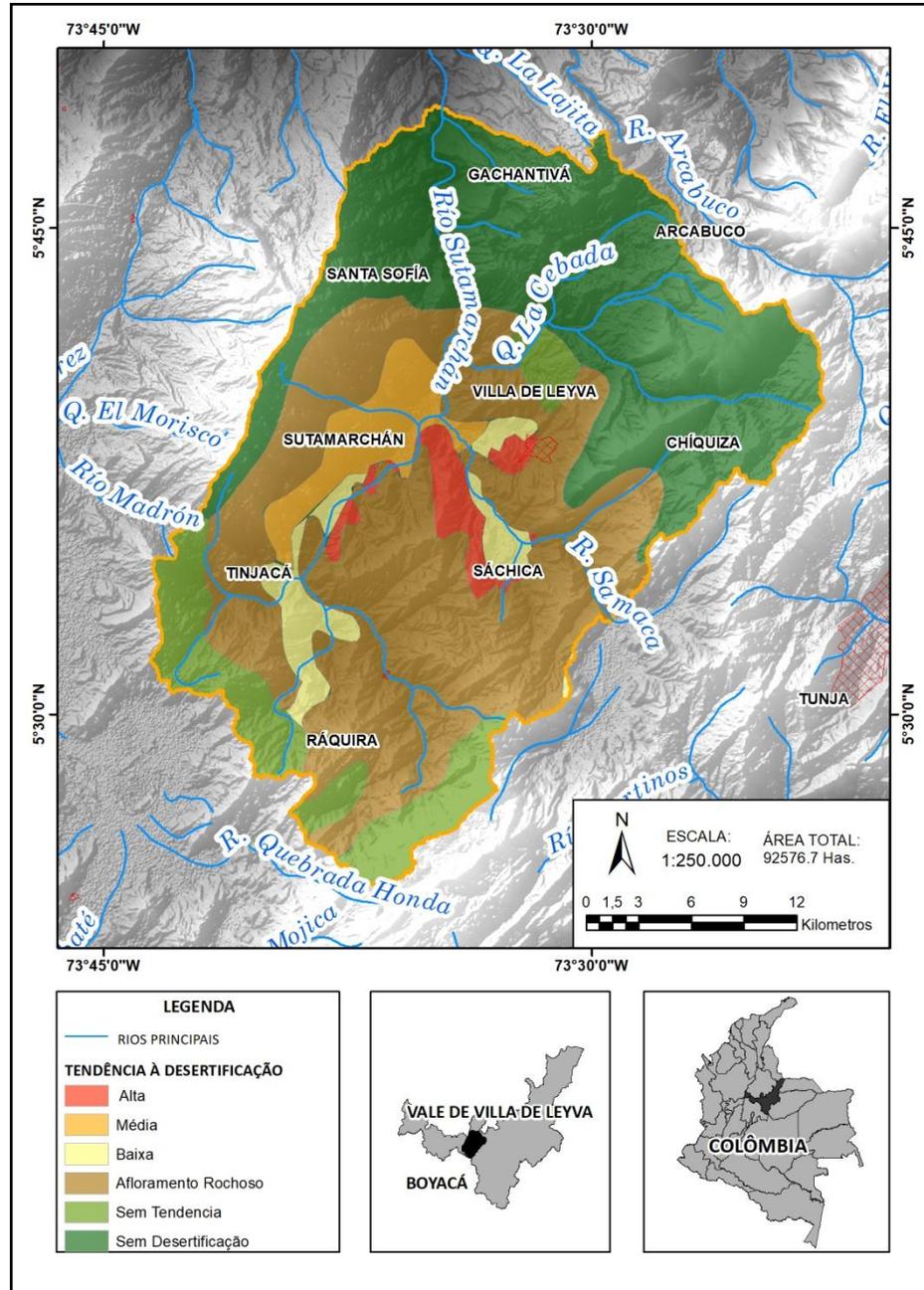


Figura 24: Mapa de tendências à desertificação na área de estudo.

Fonte: IGAC, 2010.

Tabela 6: Tipos de tendência à desertificação com as respectivas áreas da zona de estudo.

TIPO DE TENDÊNCIA	AREA HECTARES.	PORCENTAGEM
ALTA	2637,38	2,85
MÉDIA	4466,51	4,82
BAIXA	3901,45	4,21
AFLORAMENTO ROCHOSO	37805,74	40,84
NÃO "DESERTO"	9700,5	10,48
SEM DESERTIFICAÇÃO	34065,57	36,80
TOTAL	92577,15	100

Para obter o mapa de tendências à desertificação, o IGAC *et al.* (2010a), fez uma série de interpretações de imagens de sensoriamento remoto por médio das características das áreas observadas em campo e a sua classificação conforme ao grau de intensidade e magnitude do processo. Foi feita a combinação dos mapas temáticos de erosão, salinização, ecossistemas transformados e uso do solo com ferramentas dos SIG. Para gerar este mapa foram utilizadas informações de zoneamento de áreas secas baseadas nas classificações climáticas, como precipitação, temperatura e indicadores bióticos.

Essa combinação mistura camadas com diferentes escalas como foi mencionado anteriormente e as áreas com os graus de tendência a desertificação são muito gerais, porque foi um estudo feito a nível nacional, é por isso que foi utilizada a camada vetorial de erosão a escala 1:100.000 pois é a mais adequada para zonestar as áreas onde acontecem os processos de degradação de maior intensidade com base nos cálculos feitos com o NDVI e o EVI.

5.2 Comparação dos produtos NDVI dos Sensores MODIS e OLI do Landsat 8

Um dos principais problemas que aconteceram na hora de validar a metodologia foi a falta de cartografia gerada, com escalas adequadas e nas datas específicas para comparar com os produtos dos índices de vegetação das imagens MODIS, mas a questão maior foi a comparar as resoluções espaciais e temporais das outras imagens de sensoriamento remoto

disponíveis. Imagens com boa resolução espacial, como as Landsat 8 OLI (30 metros) permitem realizar análises com maior detalhe das dinâmicas dos recursos naturais, embora, estas imagens tem uma frequência temporal muito baixa que limita as análises, pela cobertura de nuvens que cobre esses lugares, como também a possibilidade de contar com um numero adequado de imagens para analisar a dinâmica vegetal em diferentes lugares (MARTÍNEZ *et al.*, 2004).

Este problema é solucionado utilizando imagens de satélite de alta frequência temporal, com as que são possíveis contar com registros em todos os meses, por vários anos e obter medidas certas para analisar a variabilidade em diferentes lugares, mas o problema com estas imagens é a baixa resolução espacial que contem, o qual faz difícil realizar estudos com maior detalhe. Para atingir os objetivos deste trabalho foram utilizadas imagens que contem baixa resolução espacial e uma alta frequência temporal.

Os padrões de distribuição dos índices de vegetação têm correspondência com o mapa de erosão, os quais são facilmente de identificar por imagens MODIS ou Landsat, pois os valores com pouca vegetação, ou sem vegetação, estão concentrados num núcleo central onde começou o processo de desertificação, como pode ser visto na Figura 25 e na Figura 26, a seguir:

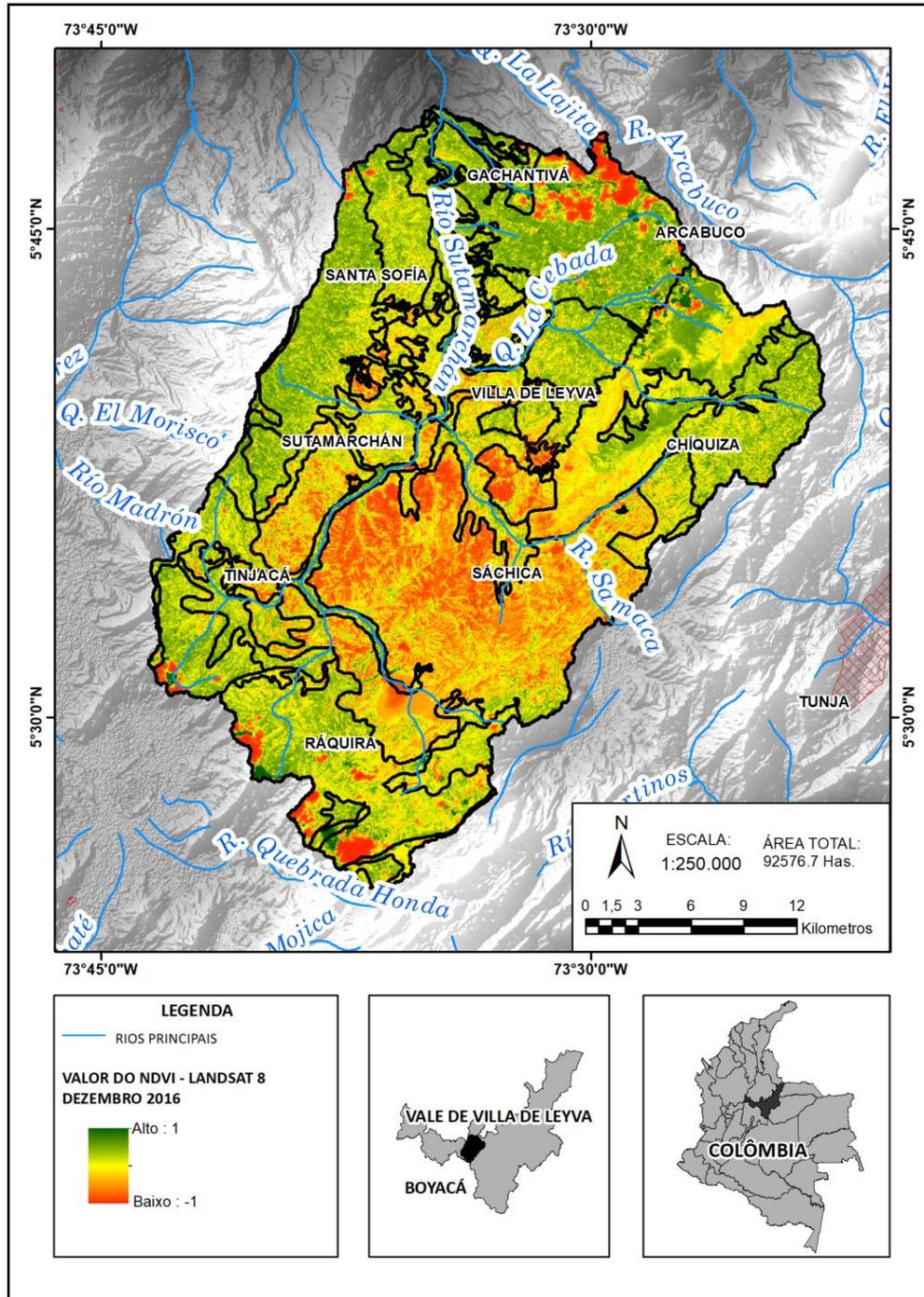


Figura 26: Imagem de NDVI – Landsat 8, 12/2016 e dos limites das áreas de erosão

5.3 Identificação e definição de regiões para o cálculo de estatísticas zonais para a geração de perfis comparativos do NDVI e EVI do Sensor MODIS e diagramas de caixa (“Box-plot”) com base na camada digital de erosão

Sobrepondo a camada de erosão sobre os 96 temas Grid do NDVI e o EVI extraídos do sensor MODIS selecionados para este trabalho, é possível a identificação de regiões agrupadas para identificar os índices mais baixos, os quais apresentam padrões de distribuição coincidindo com os diferentes graus de erosão identificados no mapa feito pelo (IGAC; *et al.*, 2010b) (Figura 25). A determinação dessas zonas permite individualizar frações da área de estudo por segmentos ou polígonos para analisar as suas condições e ver quais áreas cumprem de maneira mais efetiva às condições para a identificação dos processos de degradação ambiental (PRECIADO *et al.*, 2008). Estes tipos de análises são úteis para avaliar as áreas com processos de erosão em regiões agrícolas como neste caso, identificando as mudanças das áreas com erosão na serie temporal definida. Segundo essa análise, o polígono que apresenta tais condições pode ser observado na Figura 27 nomeado como área_2 (áreas com vegetação pouca ou dispersa com processos erosivos médios a altos), os polígonos área_1 (áreas com vegetação com processos erosivos baixos ou nulos) e área_3 (e áreas sem vegetação com processos erosivos médios a altos) foram escolhidos com o intuito de fazer comparações no comportamento dos índices de vegetação em condições diferentes de erosão.

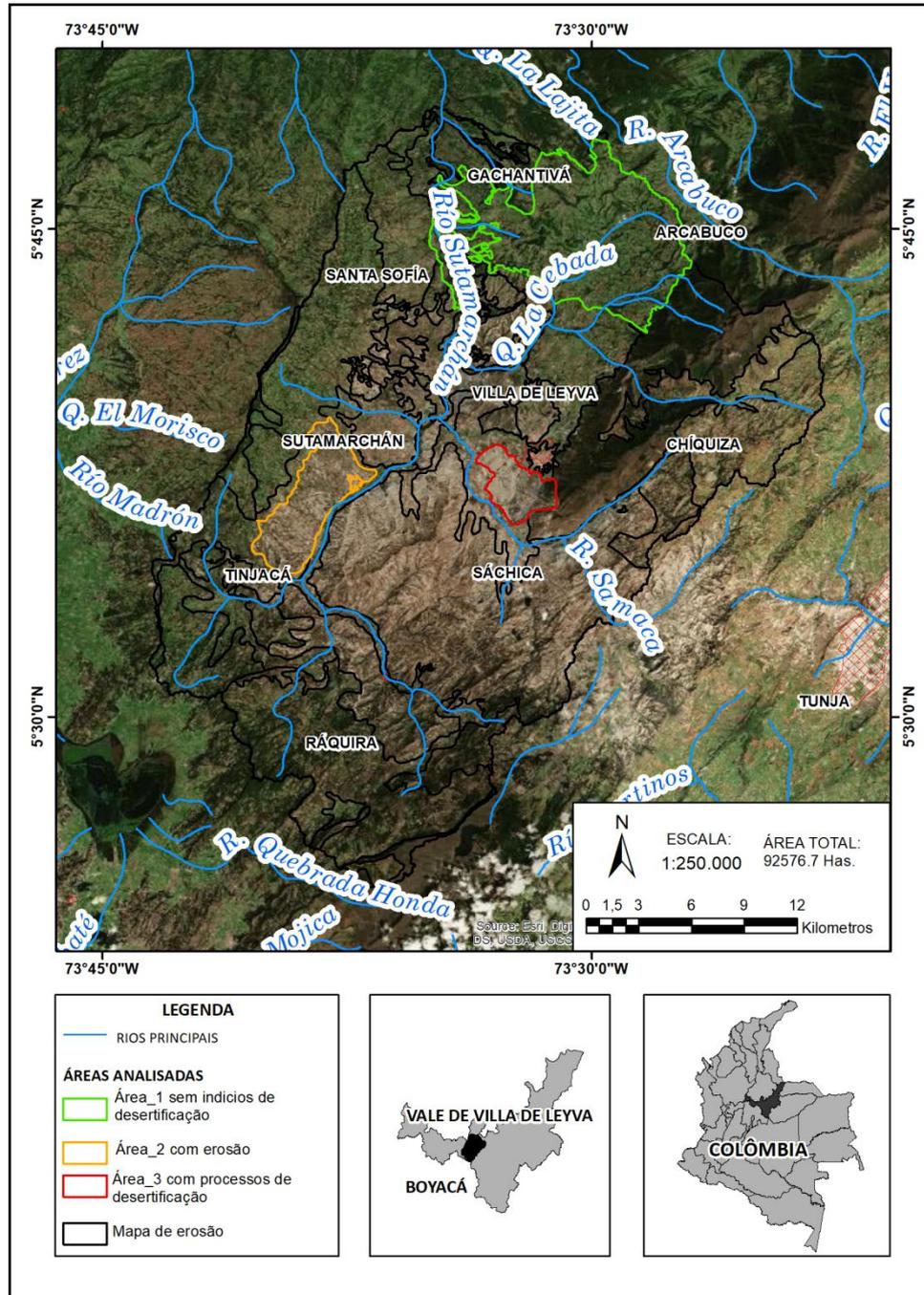


Figura 27: Áreas selecionadas para as análises dos perfis com base nas estatísticas zonais.

5.4 Preprocessamento e geração de perfis de índices de vegetação

Na etapa das análises produto MODIS MOD13Q1 para os índices de vegetação NDVI e o EVI, observou-se que as imagens apresentam em alguns pontos erro ou ausência de informação, o qual foi corrigido empregando o algoritmo Savitzky-Golay, gerando novas imagens filtradas. Na Figura 28 observa-se um exemplo da diferença entre um perfil de NDVI

feito a partir das imagens originais (linha preta) em comparação com as imagens filtradas (linha vermelha). Com o perfil filtrado consegue-se diferenciar com maior facilidade os ciclos da vegetação e analisar as dinâmicas das mudanças nas coberturas (MURILLO *et al.*, 2010).

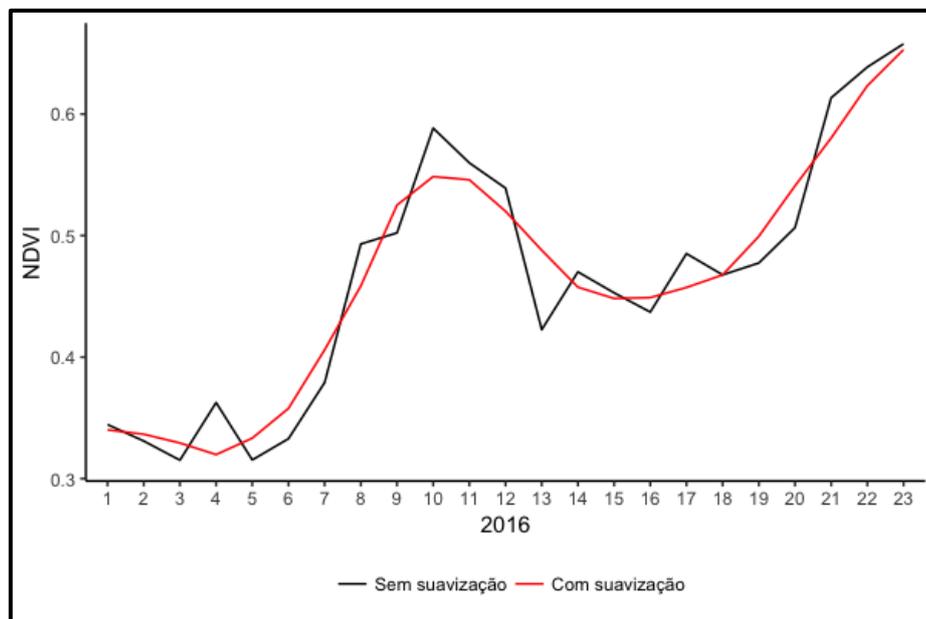


Figura 28: Comparação de um perfil de NDVI do MODIS a partir das imagens originais (linha preta) e com as imagens filtradas (linha vermelha) para as 23 imagens do ano 2016 em uma área com erosão.

Com as imagens filtradas, foi calculada uma média entre as duas imagens de cada mês para ter uma imagem mensal. Posteriormente foram elaborados os perfis anuais do NDVI e EVI entre 2001 e 2016 para os três polígonos definidos previamente (área_1, área_2, área_3), não foram incluídos os anos 2000 e 2017 porque as séries não estiveram completas para esses anos. Nos diagramas de caixas, que resumem os perfis anuais tanto para o NDVI (Figura 29) como para o EVI (Figura 30), é possível perceber que a média é maior no período de maio a junho e no mês de dezembro. Isto quer dizer que a vegetação tem mais vigor depois das épocas de chuva no ano, que é de abril a maio e de outubro a novembro, como pode ser observado no Figura 7 de precipitação média anual. Segundo a vegetação dos ecossistemas secos, a sua área foliar diminui durante os períodos de baixa precipitação, diminuindo os valores dos índices de vegetação, sendo estes meses os menos adequados para identificar os processos de desertificação, já que a resposta espectral da vegetação e das áreas em desertificação vai ser muito semelhante. Portanto, neste tipo de ecossistemas, os meses que apresentam os valores máximos dos índices são os mais úteis para estudar os processos de desertificação, já que quando o valor do índice continua sendo baixo nos

períodos de maior crescimento da vegetação, são áreas que estão desertificadas ou em processo de desertificação.

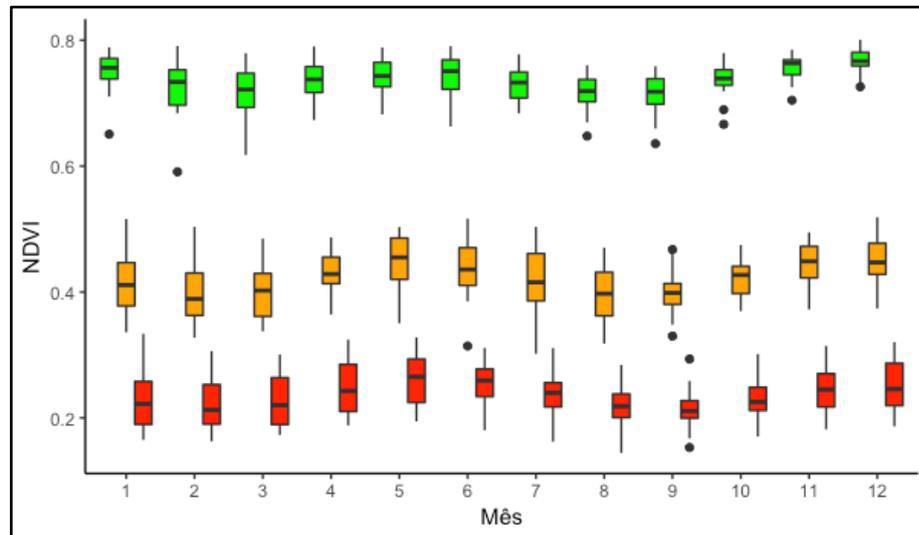


Figura 29: Diagrama de caixa para os perfis de NDVI para área_1 (verde), área_2 (laranja), área_3 (vermelho).

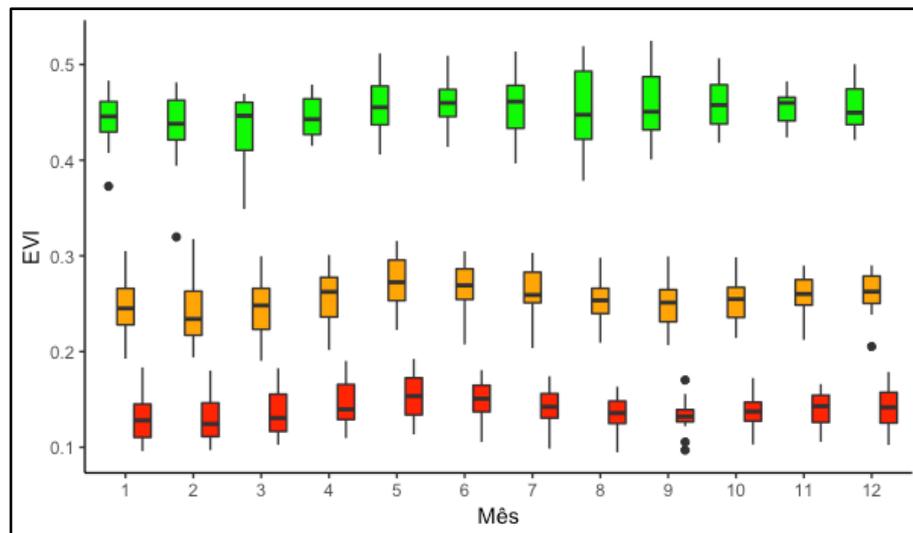


Figura 30: Diagrama de caixa para os perfis de EVI para área_1 (verde), área_2 (laranja), área_3 (vermelho).

Portanto, considerando o exposto por Fagua e Posada, (2013) e o fato que nos meses de maio e dezembro ocorrem os valores dos índices de vegetação mais altos, foram utilizadas as imagens de maio e dezembro entre o ano 2001 até 2016 para a análise dos processos de desertificação. A comparação dos índices de vegetação NDVI e EVI dos três polígonos escolhidos previamente (área_1, área_2, área_3), no período entre o ano 2001 e

2016, mostraram diferentes comportamentos entre a área sem tendência a desertificação em relação às áreas com erosão e com desertificação (Figura 31 e 32).

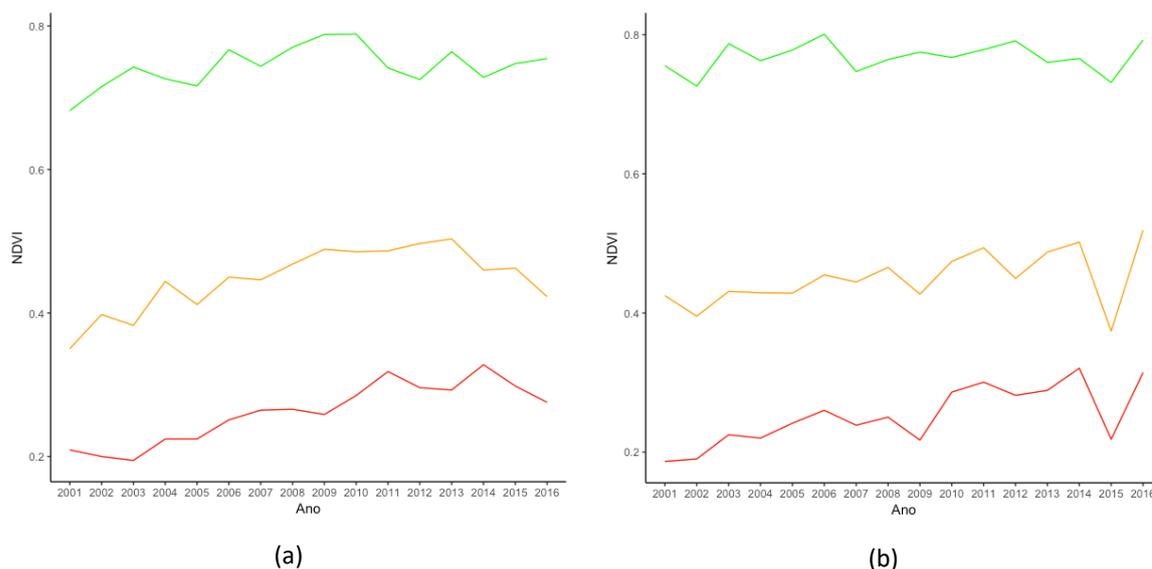


Figura 31: Perfis temporais do NDVI do MODIS MOD13Q1 para maio e dezembro do período 2001-2016 para área_1 (linha verde), área_2 (linha laranja), área_3 (linha vermelha). (a) NDVI de maio; (b) NDVI de dezembro.

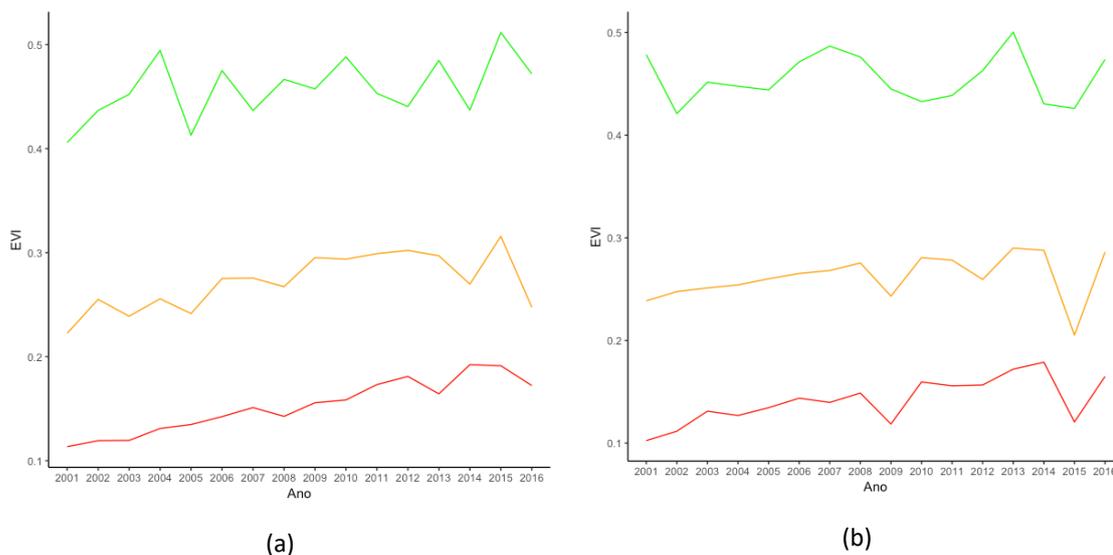


Figura 32: Perfis temporais do EVI do MODIS MOD13Q1 para maio e dezembro do período 2001-2016 para área_1 (linha verde), área_2 (linha laranja), área_3 (linha vermelha). (a) EVI de maio; (b) EVI de dezembro.

As áreas sem tendência a desertificação (perfil da área_1 em cor verde) apresentam um comportamento estável no NDVI, com valores médios de 0.7 a 0.8 em toda a série temporal, para todas as imagens dos meses de maio e dezembro. O EVI também apresenta um comportamento estável com valores entre 0.4 e 0.5 no mesmo período analisado. A pouca variação fenológica da vegetação corresponde com a diminuição ou aumento das

chuvas nos anos analisados. Estas áreas sem tendência a desertificação são as que menos variações apresentam. Esse comportamento de pouca variação não demonstra evidência forte de processos de degradação ao longo da série (CHACÓN, 1999).

As áreas com processos erosivos (perfil da área_2 em cor laranja) também apresentam um comportamento estável dos índices de vegetação com um leve aumento entre os anos 2003 e 2013. Esse aumento, entretanto, não pode ser considerado significativo, pois no caso do NDVI o aumento é menor que 0.1 pontos, já que está entre 0.4 e 0.5. Mas no período de 2014 a 2016 o NDVI tem tendência a diminuir para a série do mês de maio para esse período de tempo. No mês de dezembro é interessante observar uma queda do valor dos índices para o ano 2015, isto foi devido a um período de seca forte produzido pelo fenômeno de *El Niño*, mas a variação também não supera um ponto, pois se manteve entre 0.37 e 0.45 o valor do NDVI, e também não teve um impacto notável nas áreas sem tendência a desertificação. Além disso, o fenômeno de *El Niño*, não afeta significativamente os valores dos índices de vegetação em datas anteriores nestas áreas. Corredor *et al.* (2008), fizeram uma análise dos impactos dos fenômenos de *El Niño* e *La Niña* especificamente para o departamento de Boyacá para as variáveis climatológicas como precipitação, umidade e temperatura. O procedimento foi desenvolvido com software para modelagem espacial e predição com dados das estações meteorológicas do IDEAM distribuídas em todo o departamento. Os resultados dizem que na região do Vale de Villa de Leyva a variação da precipitação tem tendência a diminuir entre 0 – 10% da precipitação normal, para uma região que tem um comportamento de períodos de secas de forma constante. Para o fenômeno de *La Niña*, que significa um aumento das chuvas, a umidade é a variável mais afetada aumentando de forma considerável.

Outra dinâmica importante, é que nestas áreas com processos erosivos existem cultivos de cebola a céu aberto e se encontram bem distribuídos pela região. Este cultivo tem duas safras no ano, que coincidem com os períodos de menor precipitação, nos meses de janeiro e julho. Isto contribui para a diminuição dos valores dos índices de vegetação, porque o solo fica exposto logo após a retirada do cultivo. Um exemplo dos cultivos de cebola na região pode ser observado na Figura 33.



Figura 33: Área com cultivo de cebola no vale de Villa de Leyva

Fonte: Trabalho de campo, 2017.

Para o período junho – agosto de 2005 observa-se uma queda forte nos valores do NDVI, este comportamento deve-se provavelmente na retirada do cultivo, que coincide com essa época do ano. Segundo a NOAA, (2015), esse período encontra-se em normalidade climática, pois não aconteceram os fenômenos de *El Niño* nem de *La Niña*. Enquanto o ano 2010 a queda do mês de agosto, não foi muito significativa, teve presença do fenômeno de *La Niña* o que dá como resultado um leve aumento do NDVI pelo início da plantação da cultura, como pode ser visto na Figura 34.

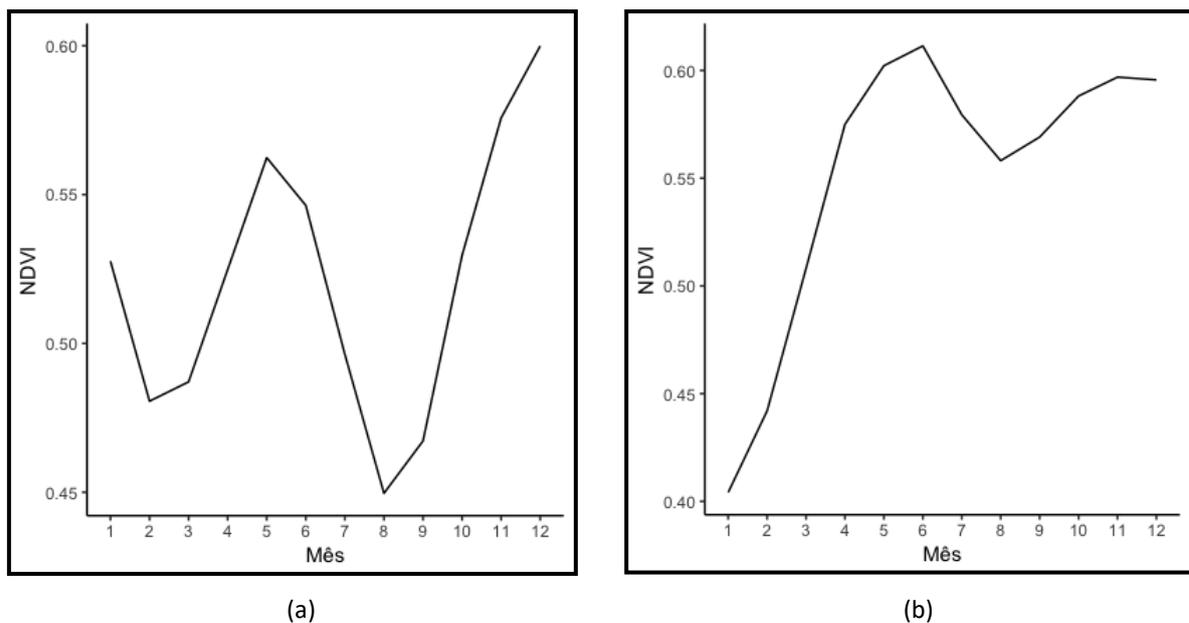


Figura 34: Comportamento dos índices de vegetação NDVI: (a) Perfil NDVI 2005; (b) Perfil NDVI 2010

A evolução das áreas com processos de desertificação ou “desertificadas” (perfil da área_3 em cor vermelha) apresenta uma tendência de aumento dos índices de vegetação principalmente por dois motivos: (a) depois de ter perdido a maioria da cobertura vegetal nativa, não é desenvolvido nenhum tipo de ocupação permanente ou atividades que tenham a ver com o uso do solo. Por este motivo em algumas zonas do “deserto” existe um processo de regeneração de vegetação de gramíneas que não são nativas, de tipo *Pennisetum*, *Melinis* e *Calamagrostis*, consequência dos processos coloniais por cultivos de trigo e cevada na região (COGOLLOS HERNÁNDEZ e PRIETO GUTIERREZ, 2004); (b) em algumas zonas da área desertificada existe recuperação de um tipo de vegetação de floresta sub-xerofítica e xerofítica, própria de regiões áridas ou semiáridas.



Figura 35: Vegetação encontrada em áreas com processos de desertificação no vale de Villa de Leyva. (1) *Pennisetum*, (2) *Melinis* e (3) *Calamagrostis*.

Fonte: COGOLLOS HERNANDEZ, 2004.

O segundo motivo do aumento dos índices de vegetação nas áreas com processo de desertificação obedece às dinâmicas de expansão urbana, principalmente da cidade de Villa de Leyva. Esta cidade é um dos principais pontos turísticos a nível nacional, tendo dinâmicas imobiliárias importantes onde o preço da terra está em crescimento permanente. Nesse sentido ocorre a mudança de uma paisagem desértica, para uma paisagem com áreas mais verdes para as novas ocupações, Figura 36 (acima ano 2006, abaixo ano 2016):



Figura 36: Áreas com tendência a aumentar a vegetação nas zonas de expansão urbana e próximas a áreas com desertificação.

Fonte: Google Earth, 2017.

5.5 Identificação das tendências de mudanças nos índices de vegetação em séries temporais

A análise das tendências de mudanças dos índices de vegetação foi feita com o método de Mann-Kendall, este método analisa series com correlação das freqüências relativas dos dados das imagens analisadas e demonstra as tendências de mudança, como também a direção das variações e permite avaliar se essas variações são significativas ou não (GINER *et al.*, 2012). A análise foi realizada para os meses de maio e dezembro do período 2001-2016, tanto para o NDVI como para o EVI (Figura 37). Observa-se que as áreas com erosão, que estão próximas ao núcleo do “deserto”, apresentam uma tendência à diminuição dos índices de vegetação tanto em maio como em dezembro. As áreas do “deserto” mostram uma tendência a aumentar, mas como se observa nos perfis da Figura 31 e da Figura 32 os valores dos índices são bem baixos durante todo o período analisado, o que representa pouca

presença da vegetação, que foi também observado em campo, como pode ser visto na Figura 38.

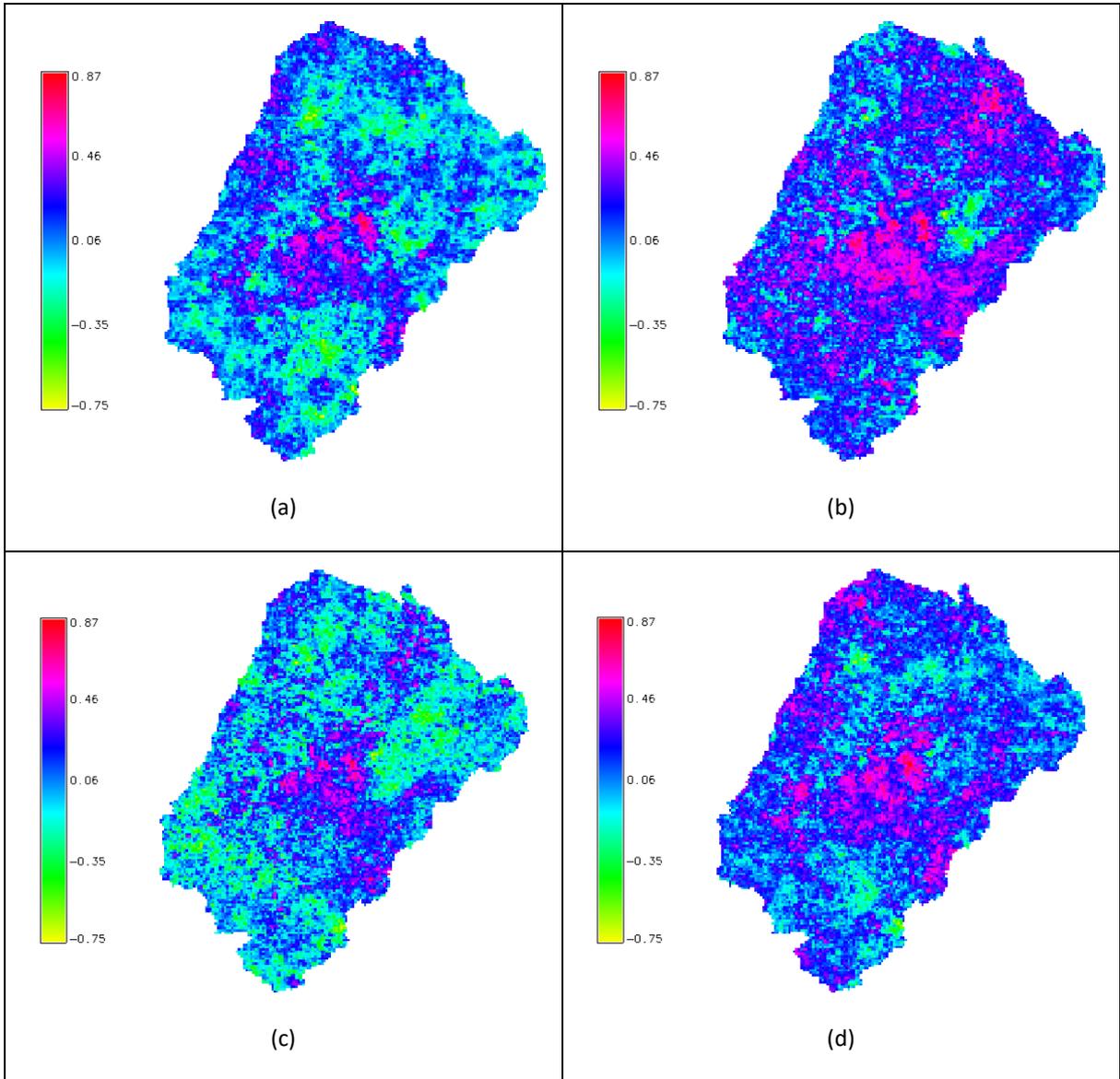


Figura 37: Tendências de mudança do NDVI e EVI pelo método Mann-Kendall: (a) NDVI de maio; (b) NDVI de dezembro; (c) EVI de maio; (d) EVI de dezembro.



Figura 38: Área com processos de erosão e com tendência a desertificação.

Fonte: Panoramio – Google Earth, 2017.

Nas áreas onde existem processos de desertificação, os valores de Mann-Kendall são próximos a 0 ou positivos, indicando que a tendência se manteve constante ou que houve um leve aumento na cobertura vegetal. Comparando as tendências do NDVI com o EVI nos dois meses analisados, observa-se que no caso do NDVI em maio tem-se uma área maior com tendência negativa em comparação com dezembro (Tabela 7), isso acontece porque os índices de vegetação são maiores em dezembro devido ao período de chuva de outubro - novembro, que é maior do que o período chuvoso abril – metade do maio.

Tabela 7: Porcentagem de área com tendência positiva e negativa para o NDVI e EVI de maio e dezembro

	ÁREA COM TENDÊNCIA POSITIVA (%)	ÁREA COM TENDÊNCIA NEGATIVA (%)
NDVI MAIO	78,42	21,58
NDVI DEZEMBRO	85,39	14,61
EVI MAIO	56,90	43,10
EVI DEZEMBRO	81,17	18,83

Nos mapas de tendências de Mann-kendall para o EVI é possível reconhecer uma tendência maior a diminuição dos índices em comparação com os mapas de tendências para o NDVI. No caso das imagens do EVI a tendência a diminuir é maior do que mostra as imagens do NDVI porque geralmente os valores do EVI são menores do que corresponde ao NDVI; o EVI foi desenvolvido para aperfeiçoar o sinal recebido pela vegetação e identificar diferenças naquelas áreas onde é possível uma saturação do NDVI por alta densidade de biomassa (HUETE *et al.*, 2002). Além de ser mais sensível às variações da cobertura vegetal, esse aumento da sensibilidade acontece à fenologia e aos tipos de uso da terra (MAS, 2011).

A tendência de diminuição dos índices de vegetação nas áreas com processos de erosão tem relação com o comportamento das freqüências relativas, já que a magnitude de diminuição destas freqüências é maior do que os aumentos. Isto pode ser observado nos perfis elaborados para a análise do comportamento do NDVI e do EVI no período entre 2003 e 2013, Figura 31 e Figura 32, apresentando também quedas ao longo de esse período indicando que o aumento não foi muito significativo. Por outro lado, a diminuição dos índices de vegetação a partir do ano 2013 foi maior num período de tempo menor. Por isso os gráficos de tendências de diminuição pelo algoritmo Mann-Kendall apresentam esse comportamento, como pode ser visto na Figura 39.

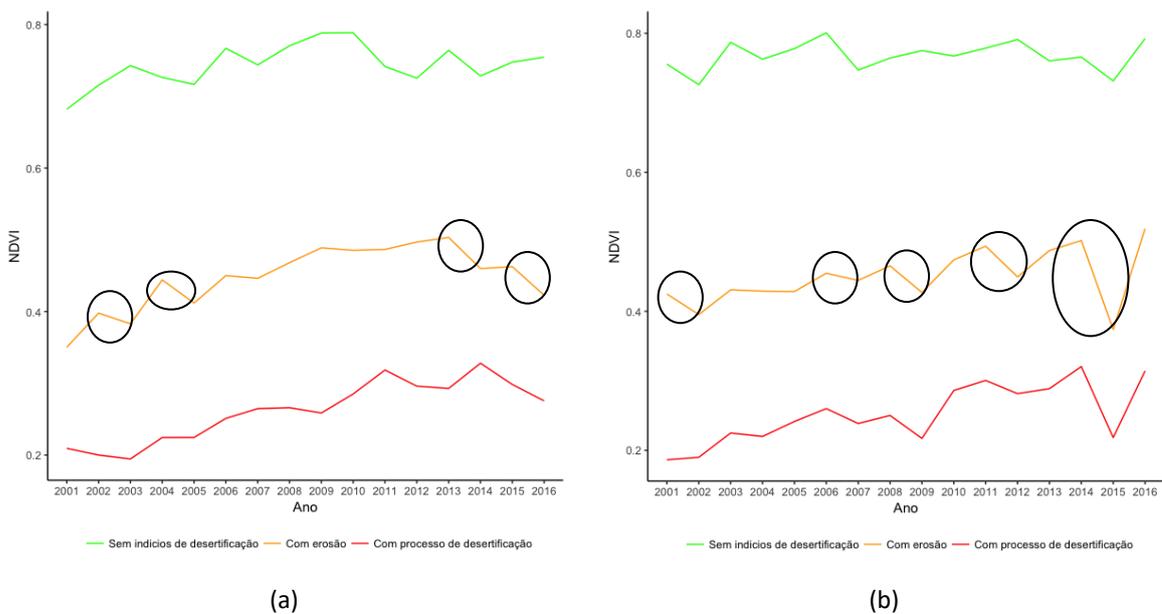


Figura 39: Quedas das freqüências do NDVI como resultado da tendência a diminuição em áreas com processo de erosão modelo Mann-Kendall: (a) Perfil NDVI de maio; (b) Perfil NDVI de dezembro

A partir dos diagramas de caixa, que resumem os valores dos índices de vegetação mensais do período analisado, apresentados nas Figura 29 para o NDVI e na Figura 30 para o EVI, observa-se que os valores médios de maio e dezembro para cada índice são muito semelhantes. Portanto, a fim de selecionar os pixels com valores que estão acima da média da área_3 e abaixo da média da área_2, foram empregados os mesmos intervalos nos dois meses tanto para o NDVI como para o EVI. No caso do NDVI o intervalo foi definido entre 0.25 e 0.45, e no caso do EVI foi entre 0.15 e 0.27. Isto com o fim de sobrepôr o tema digital que contem os pixels com tendência negativa do modelo Mann-Kendall sobre os respectivos índices de vegetação do ano 2016 para os meses de maio e dezembro com os valores identificados e classificados como zonas em processo de desertificação no último ano, para gerar os mapas de desertificação.

As áreas com processos de desertificação identificadas com o procedimento anterior podem ser observadas desde a Figura 40 até a Figura 43. No mês de maio os dois índices conseguem identificar uma área maior que em dezembro (Tabela 8), isto pode ser devido porque em dezembro a média de precipitação é maior que em maio, tendo como consequência um incremento na vegetação. Em relação aos índices, a área com o NDVI é maior que o EVI.

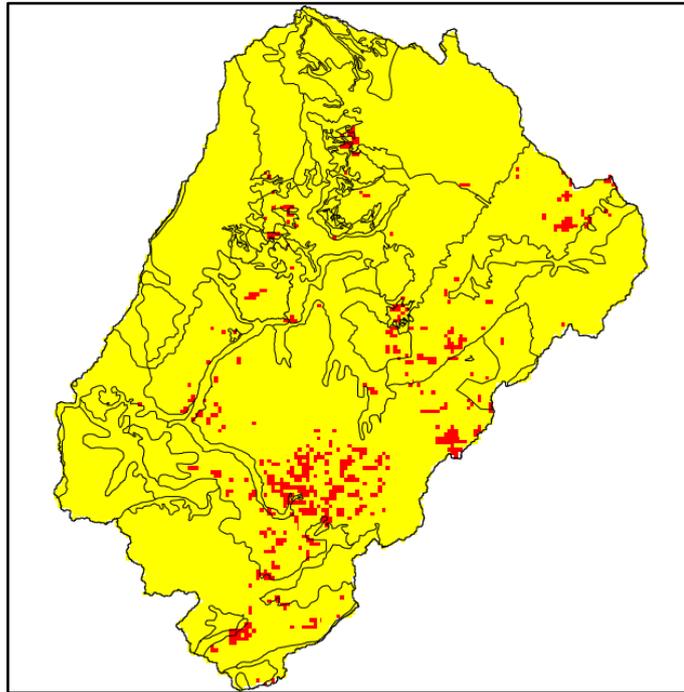


Figura 40: Áreas com processos de desertificação (vermelho) por Kendall negativo do NDVI de maio e o NDVI de maio 2016.

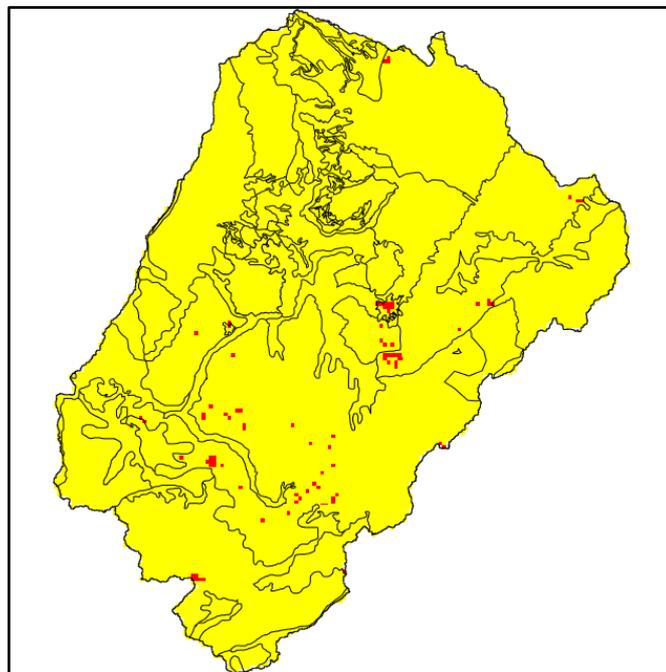


Figura 41: Áreas com processos de desertificação (vermelho) por Kendall negativo do NDVI de dezembro e o NDVI de dezembro 2016.

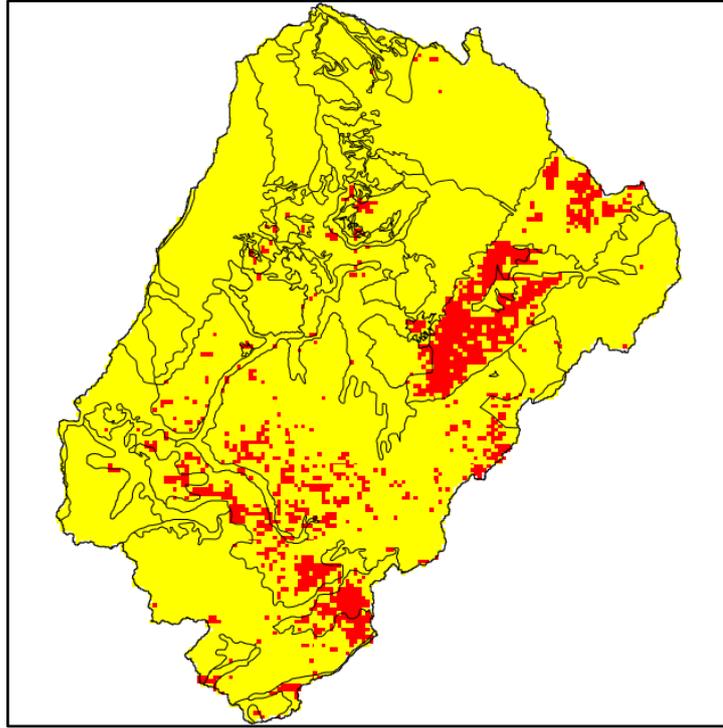


Figura 42: Áreas com processos de desertificação (vermelho) por Kendall negativo do EVI de maio e o EVI de maio 2016.

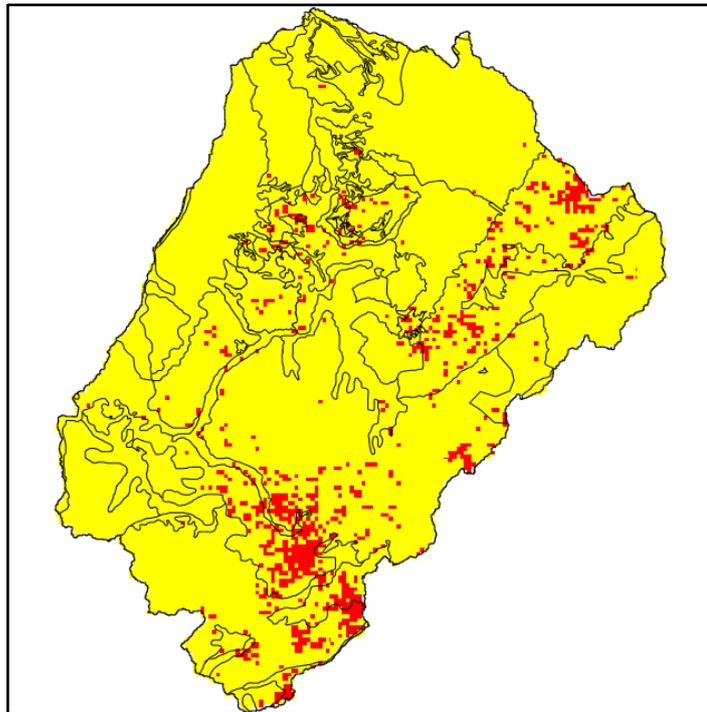


Figura 43: Áreas com processos de desertificação (vermelho) por Kendall negativo do EVI de dezembro e o EVI de dezembro 2016.

Tabela 8: Porcentagem de área total em processo de desertificação por tipo de índice e mês

TIPO INDICE / SÉRIE	ÁREA (%)
NDVI MAIO	3,74
NDVI DEZEMBRO	0,55
EVI MAIO	9,45
EVI DEZEMBRO	5,97

Fazendo a contagem dos pixels identificados como zonas em desertificação, sobrepostos com a camada de erosão foi possível identificar que as zonas do mapa de erosão com o grau “muito alta” contem a maioria das áreas em processo de desertificação (Figura 44). A informação completa das áreas pode ser observada no Anexo 3.

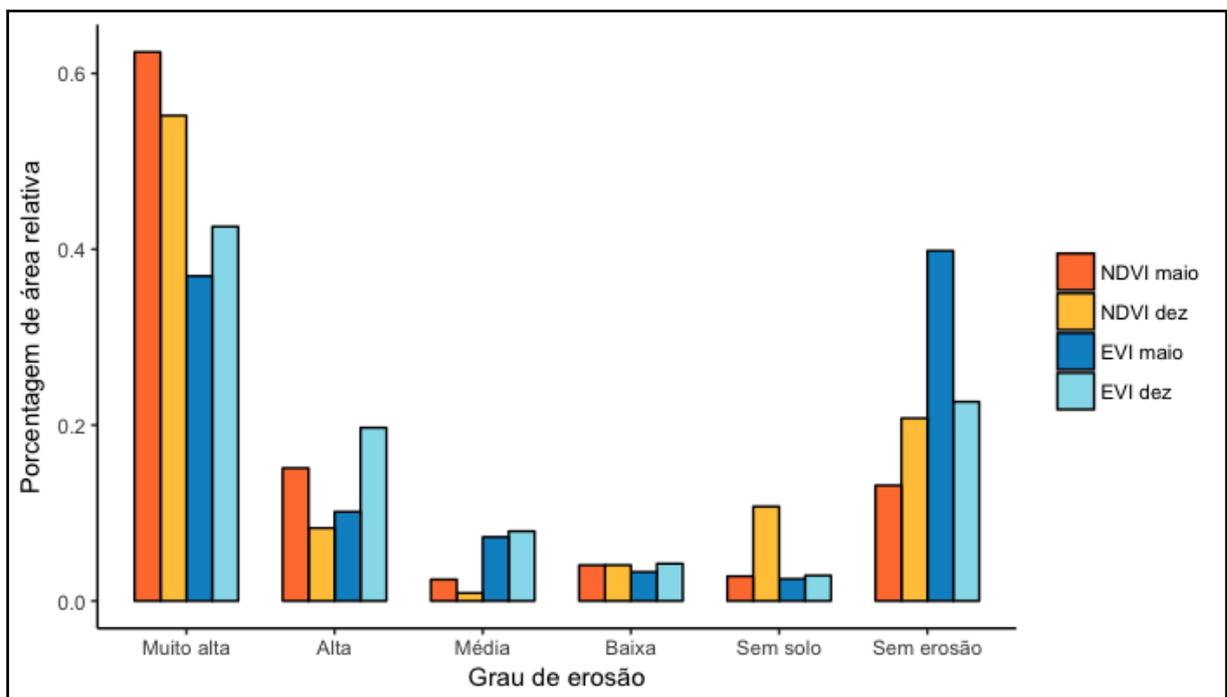


Figura 44: Cálculo de porcentagem dos pixels identificados em processos de desertificação segundo o grau de erosão.

Os resultados indicam que o NDVI é mais ajustado na realidade que o EVI, pois para as duas séries analisadas dos dois índices, na zona nordeste (que tem forma de triângulo) na área de estudo apresenta tendências negativas muito fortes de diminuição do EVI em áreas que segundo o mapa de erosão, não acontece este processo. Esta área esta composta por um ecossistema de “*páramo*” e é uma área protegida com a figura de “*Santuário de Flora e Fauna de Iguaque*” pelo Sistema Nacional de áreas Protegidas da Colômbia, o que quer dizer que não é permitida nenhuma atividade de exploração ambiental e nem de qualquer uso não sustentável, mas a causa da diminuição dos valores dos índices de vegetação é por queimas acidentais pela falta de controle das autoridades sobre o turismo nessas áreas. Na Figura 45 se pode observar um exemplo do ecossistema de “*páramo*” e na Figura 46 o mapa de localização dessa área protegida.



Figura 45: Fotografia de um ecossistema de “*páramo*”

Fonte: Panoramio – Google Earth, 2017.

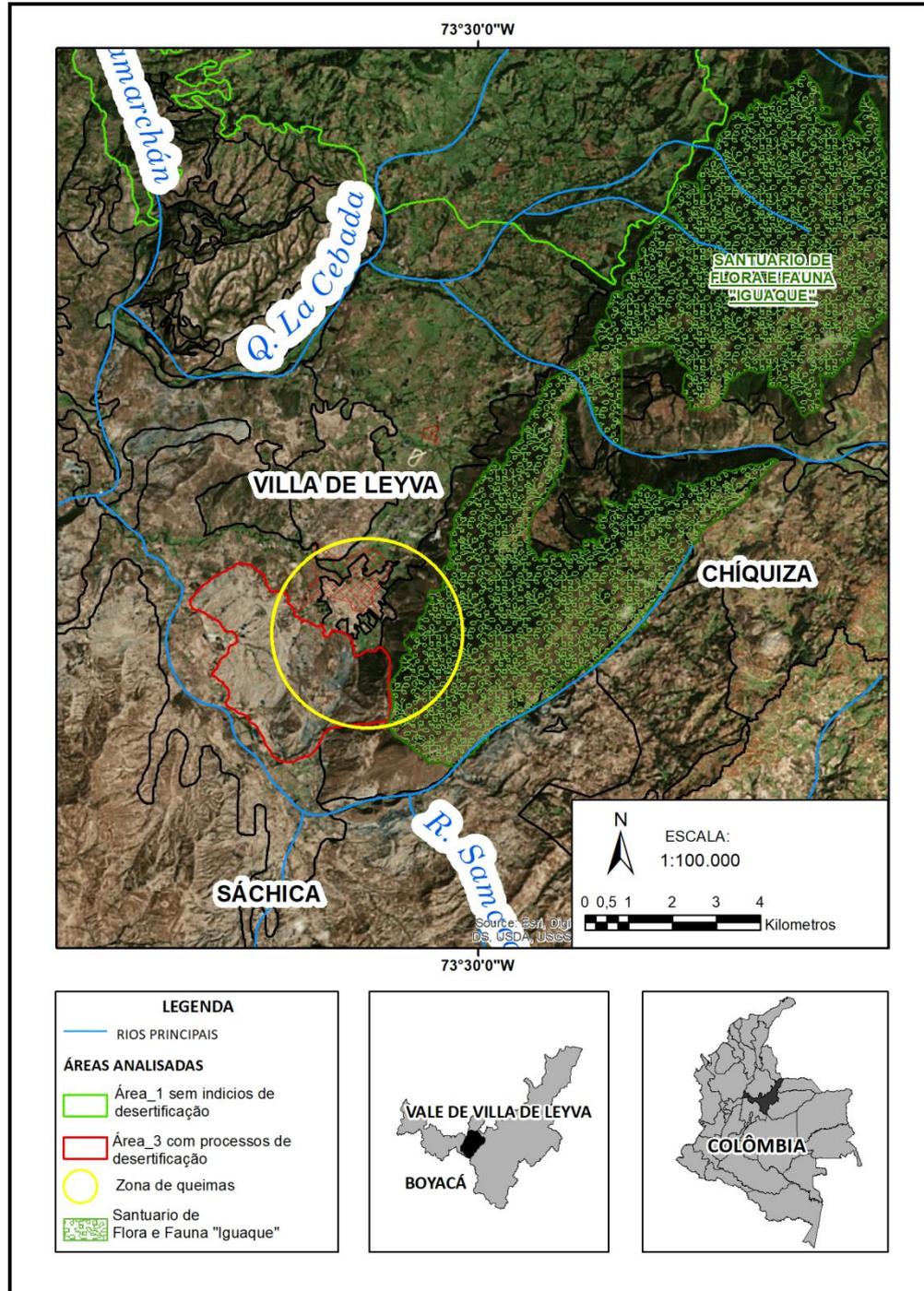


Figura 46: Mapa das áreas com ecossistema de “páramo” no Santuário de flora e fauna “Iguaque”

O ecossistema de “*páramo*” é um tipo de ambiente que só existe nas alturas maiores a 2800m. de altura na cordilheira dos Andes equatoriais na América do Sul, mais especificamente na Colômbia, Equador, Peru e Venezuela, sendo a Colômbia a que maior extensão tem deste ecossistema abrangendo o 50% do total a nível mundial (CABRERA, 2014). Os paramos contêm muita biodiversidade, pois é o lugar de nascimento da água que

consume o 70% da população colombiana, além disso, possui espécies de flora e fauna endêmicas, por isso a necessidade de estabelecer mecanismos de conservação nestas áreas. Os paramos apresentam altas condições de fragilidade pela relação entre o clima e a vegetação, a temperatura oscila entre os 2°C e os 10°C e a vegetação esta composta na maioria por arbustos e cresce bem devagar pelo frio, pelo que a fotossíntese a absorção de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica é um processo lento (VÁSQUEZ, 2011).

Neste sentido, as áreas com ecossistemas de “*páramos*” apresentam valores baixos de refletância, pois existe pouca absorção da radiação eletromagnética devido a que a cobertura nessas áreas é na maioria arbustiva de pisos térmicos altos (maior de 2800 m) e climas secos.

O setor que maiores possibilidades de apresentar tendências negativas nos índices de vegetação e a zona sul deste “triângulo”, pois, essa zona não faz parte do “*Santuário de Flora e Fauna de Iguaque*” e se encontram atividades de exploração de areias para construção, delimitado com circulo amarelo como pode ser visto na Figura 46.

5.5 Identificação das áreas com processos de degradação ambiental e a sua evolução até a atualidade

Para identificar as zonas com processos de mudanças ambientais, foi elaborado o mapa da Figura 47 que mostra os pontos verificados em campo com base nas áreas com processos de erosão, de desertificação e sem tendência a desertificação, e que foram analisadas com estatísticas zonais mediante a elaboração de perfis dos índices de vegetação NDVI e do EVI.

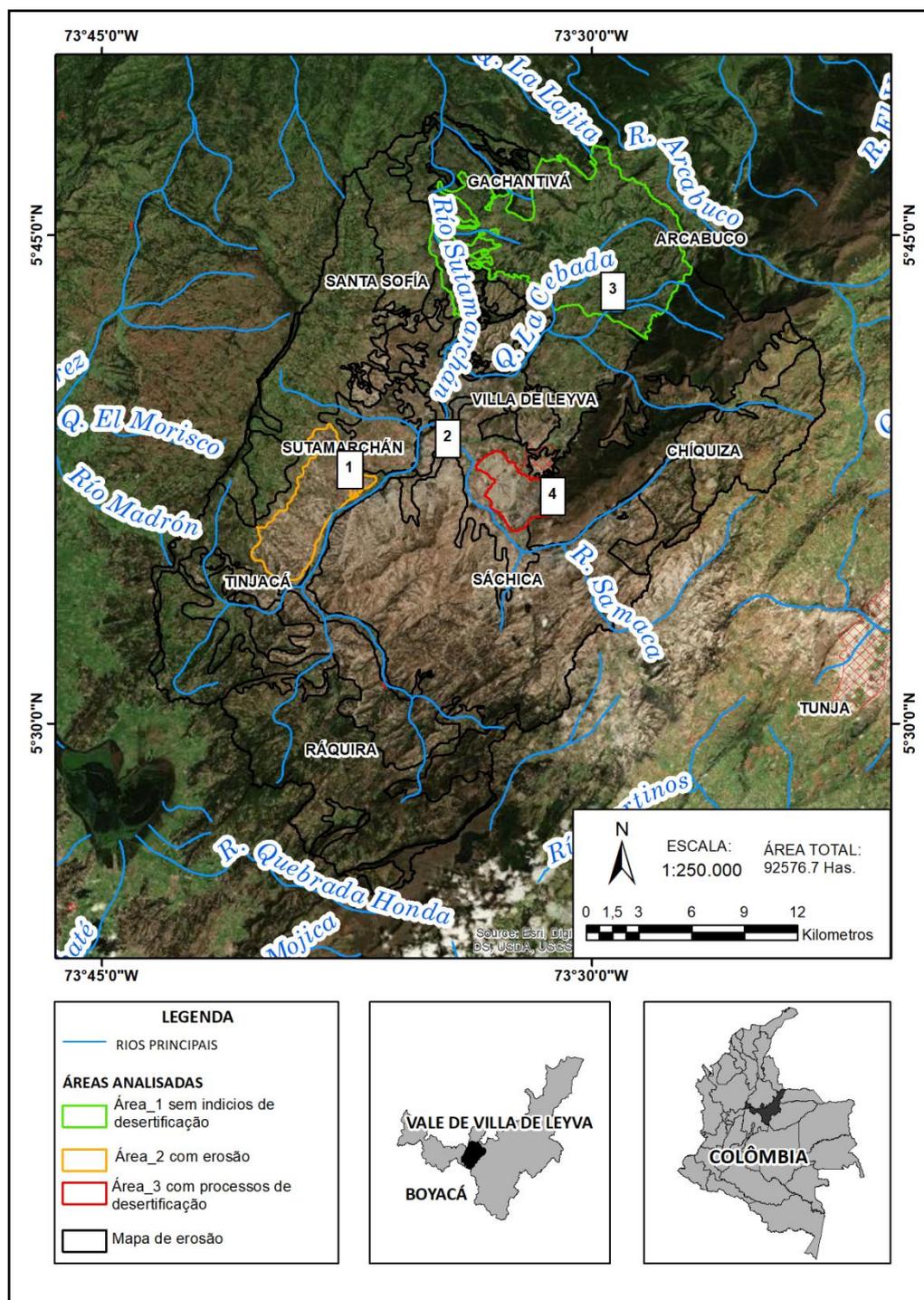


Figura 47: Mapa de localização dos pontos amostrais

As áreas caracterizadas com processos de degradação ambiental, por erosão e por desertificação, obtidos a partir de imagens de satélite foram verificadas para avaliar a sua correspondência com a realidade, e para complementar algumas análises comparativas. Os processos de degradação ambiental em áreas com erosão têm relação com práticas

agrícolas, principalmente por cultivos de tomate sob estufa. Em um prazo de 10 anos esta atividade colocou o departamento de Boyacá como a primeira região produtora de tomate sob estufa, com uma produção de 43.224 toneladas por ano (DANE, 2014).

Fazendo uma análise comparativa é possível observar a magnitude das transformações ambientais na região, produto do cultivo de tomate sob estufa, que em menos de 10 anos, teve um incremento de 47.9 % (MADR, 2017). O sistema de cultivo de tomate sob estufa é uma atividade que requer muita disponibilidade de água, lembrando que esta tem aridez, como também de fertilizantes agrícolas para o crescimento. Além da construção massiva de estufas também é necessária uma fonte de água, e é por isso que a construção de açudes também teve incremento significativo na região. A Figura 48 apresenta duas fotografias do sistema de estufas e armazenamento de água (Ponto 1).



Figura 48: Estufa para cultivo de tomate e açude para armazenamento de água para o cultivo.

Fonte: Trabalho de campo, 2017.

As Figura 49 e Figura 50 mostram duas imagens comparativas para destacar o incremento desta atividade na área entre os anos 2006 e 2016 (Ponto 1).

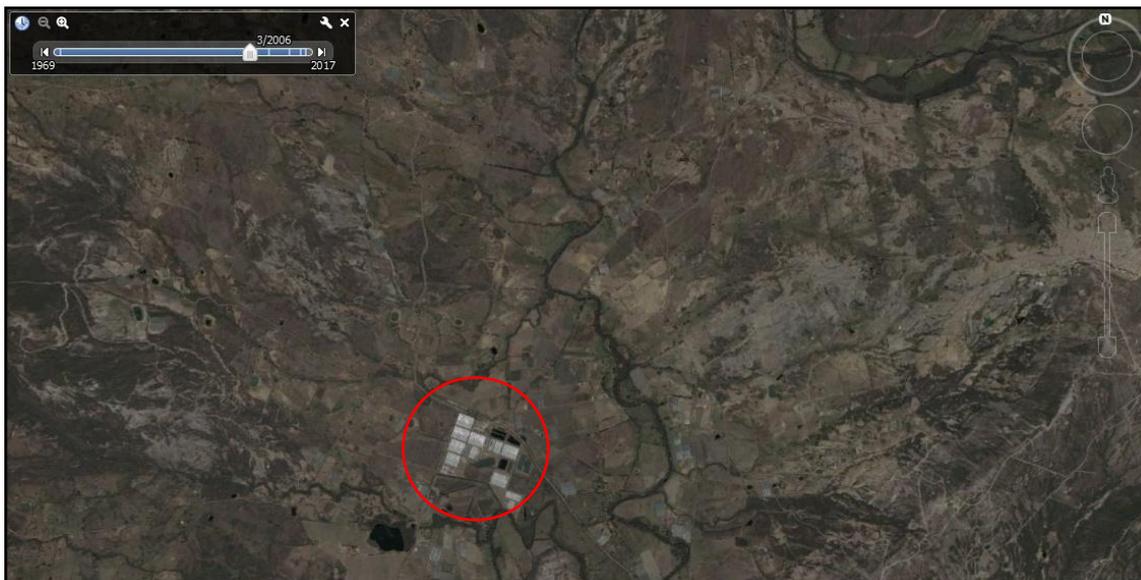


Figura 49: Área com início da presença de estufas para cultivo de tomate – ano 2006 Ponto 1.

Fonte: Google Earth, 2017.



Figura 50: Área com aumento de estufas para cultivo de tomate – ano 2016 Ponto 1.

Fonte: Google Earth, 2017.



Figura 51: Áreas sem tendências a desertificação no Vale de Villa de Leyva

Fonte: Trabalho de campo, 2017.

Como já foi mencionado, as áreas com desertificação apresentam algum grau leve de recuperação por regeneração de vegetação de tipo gramínea, nas áreas reconhecidas com o processo de desertificação mais antigo.

Outro tipo de recuperação das áreas degradadas é devido expansão urbana, pois segundo o plano de desenvolvimento municipal de Villa de Leyva (LEYVA, 2016), essa atividade está permitida nas zonas com erosão se o uso principal da terra compreende: recuperação dos solos, florestal protetor e residencial, mas na realidade, essa recuperação das áreas suburbanas é por adequação das terras com material vegetal com o fim de visualizar uma paisagem “mais verde” e não uma recuperação ambiental sustentável. Esses tipos de expansão urbana nessas áreas podem trazer problemas de sustentabilidade pela necessidade de contar com uma oferta ambiental e de infraestrutura de serviços públicos, mas isso leva a outro tipo de análises e de discussão.

Na área que hoje é “deserto” e que concentra o núcleo, na parte sul de este tipo de ecossistema foi sujeita por muito tempo para desenvolver atividades agropecuárias e de produção de cerâmicas. Esta ultima atividade em alguns pontos localizados esta gerando ainda a eliminação das capas superiores do solo para a extração dos materiais do subsolo, assim como a extração de madeira para os fornos, é por isso que a tendência de diminuição dos índices de vegetação continua, gerando mais focos de processos de desertificação (CAMACHO *et al.*, 1995).

A combinação do mapa de tendências negativas do modelo Mann-Kendall para o NDVI de maio de 2016 sobre os respectivos índices de vegetação do ano 2016 da como resultado o mapa com as áreas mais suscetíveis a sofrer processos de desertificação para o último ano. A combinação feita com os resultados obtido no mês de maio é mais representativa, pois é resultado do período seco mais forte e de menor precipitação, o tem mais relação com o comportamento das áreas com os processos de desertificação mais avançados. Além disso, as mudanças climáticas têm tendência a aumentar a temperatura e diminuir as precipitações, o que faz este resultado com mais semelhante com a realidade (CAMACHO *et al.*, 1995; IGAC, 1990).

Os focos de degradação localizados entre os pontos 1, 2, e nas proximidades do 3, verificados em campo tem correspondência com as áreas de maior distribuição dos cultivos de tomate sob estufa, dinâmica em crescimento permanente. No ponto 4 a tendência de diminuição dos índices de vegetação acontece por processos de degradação pela extração de areias para construção justo na periferia da cidade de Villa de Leyva, como pode ser visto na Figura 52.



Figura 52: Zonas de extração de areias para construção (Ponto 4).

Fonte: Panoramio – Google Earth, 2017.

As maiores das áreas em processo de degradação por desertificação se encontram em zonas com erosão muito alta e alta, o que coincide com os padrões de distribuição dos índices e as tendências analisadas com relação às fontes de informação adquiridas, no caso da zona de áreas sem erosão, que tem forma de triângulo, zoneada na cor verde escuro, contem padrões de degradação, mas não é por processos de erosão, mas pela retirada da cobertura vegetal pelos incêndios que nessas áreas são constantes, como pode ser observado na Figura 53.

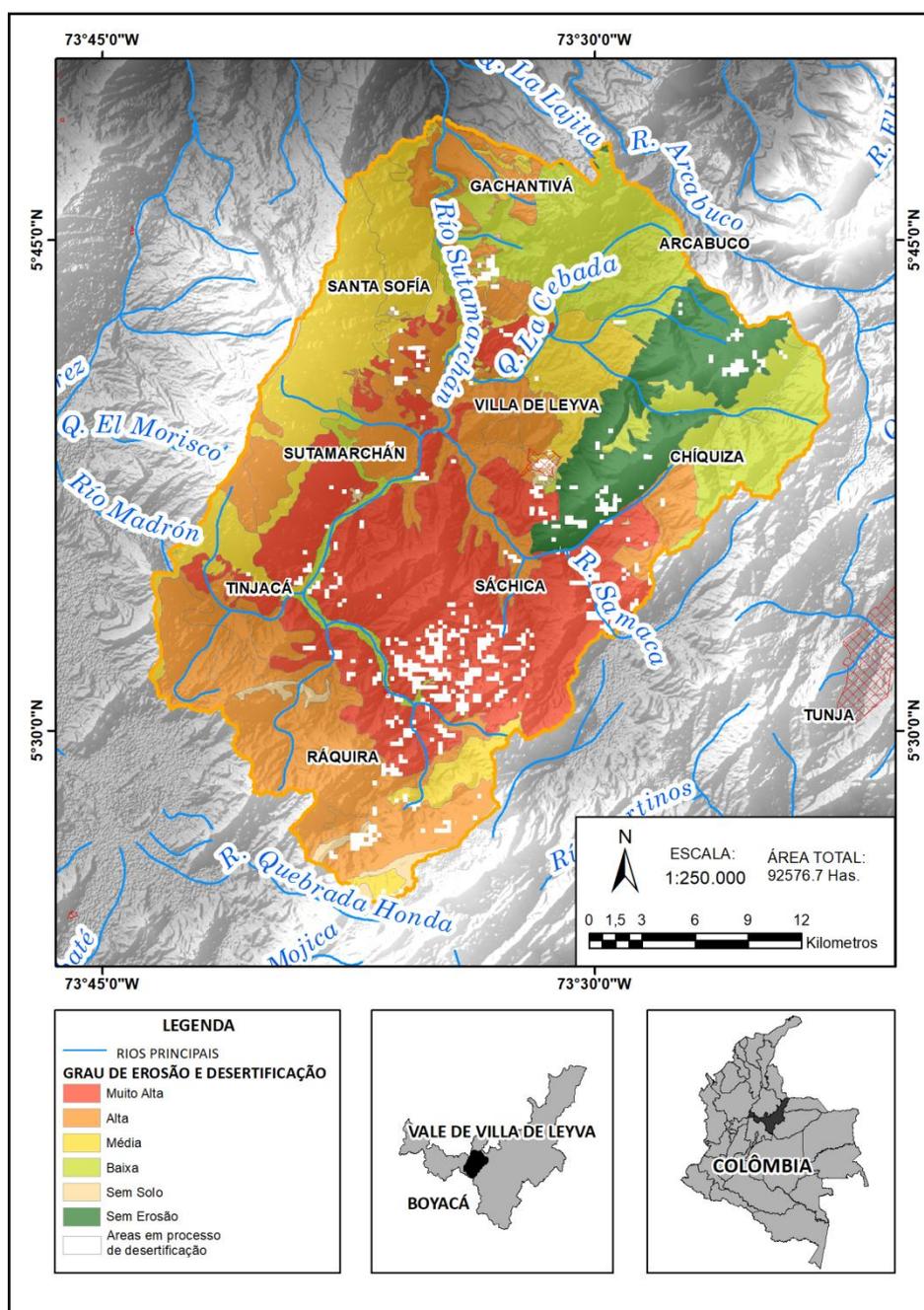


Figura 53: Mapa de processos de degradação por desertificação segundo o grau de erosão.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As imagens MODIS utilizadas para o desenvolvimento de este trabalho tiveram um resultado ótimo para analisar a dinâmica dos processos de degradação ambiental no vale de Villa de Leyva.

Os processos de degradação ambiental que atualmente acontecem no vale de Villa de Leyva não fazem parte de um processo de degradação única e global, pois não existe evidência de expansão das áreas desérticas nem do processo de erosão de maneira contínua. O processo inicial de desertificação foi ocasionado por práticas de exploração no meio ambiente desde a época colonial introduzindo espécies exóticas e pela modificação dos cursos dos corpos de água. Na atualidade, este processo acontece de forma mais pontual e esta associado a fatores antrópicos, principalmente pelas práticas agrícolas não sustentáveis na região, principalmente pelo incremento dos cultivos de tomate sob estufa.

As características geográficas da área em relação aos processos geomorfológicos, as características dos solos, o componente climático determinado pela sazonalidade das épocas secas e de chuva, associadas às atividades do uso do solo concorrem em esses processos de degradação ambiental.

As áreas que na atualidade sofrem processos de erosão com uma atividade intensa de agricultura sob estufa estão em risco de acelerar um processo de degradação maior e sejam transformadas como desertos.

Nas áreas do que hoje é “deserto” e que tiveram uma intervenção humana muito intensa e prolongada, a vegetação original tem tendência de ser suplantada por vegetação xerofítica, que dado o caso de não ter sofrido esse processo de degradação com essa intensidade, causado pela sobre-exploração do solo e se ao futuro não continua um padrão forte de pressão antropogênica, cabe à possibilidade que aconteça um processo lento de recuperação natural.

Na hora de avaliar os processos de degradação ambiental por meio de ferramentas tecnológicas como as imagens de satélite e os índices de vegetação, o EVI mostra resultados melhores em áreas que tem uma vegetação mais densa, mas para este tipo de estudo que

trata de zonas áridas e semiáridas, o NDVI apresenta resultados satisfatórios para este tipo de avaliações.

RECOMENDAÇÕES

Ante os riscos que muitas áreas continuem com processos de degradação deve se dar a prioridade às ações de proteção e recuperação efetiva, tendo em conta que muitas delas têm uma representatividade ecossistêmica e essa representatividade é pouco tida em conta no sistema de áreas protegidas da Colômbia. Os ecossistemas de zonas áridas e semiáridas também contem espécies de flora e fauna que são representativas e tem grande significância para o nosso país, faz parte de um patrimônio natural e cultural que contribui a nossa definição como nação.

É necessária a implementação de novas metodologias para avaliar os processos de desertificação com a finalidade de contribuir a geração de conhecimento para o apoio e estabelecimento de novos planos de conservação de estas áreas, com acompanhamento de sistemas de monitoramento e avaliação permanente. Esses sistemas devem ter articulação com os planos de ordenamento do território para prever uma degradação contínua de áreas maior especialmente aquelas que apresentam um grau de alta e muito alta.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALZATE, A. B. E. **Diagnóstico de la sostenibilidad ambiental: bajo un enfoque sistémico de las interrelaciones sociedad-naturaleza : base teórico-metodológica y aplicación a través de Indicadores Sistémicos Ambientales - ISA, espaciales o de tercera generación.** Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - UNAL. Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), 2008. ISBN 9789587190298.

ARNOUS, M. et al. Remote Sensing Technology Applications For Desertification Mapping: A Case Study, Oudia Area, Tunisia. In: MARINI, A. e TALBI, M. (Ed.). **Desertification and Risk Analysis Using High and Medium Resolution Satellite Data:** Springer Netherlands, 2009. cap. 16, p.183-197. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security). ISBN 978-1-4020-8936-7.

BELTRÁN, M. A. L. **Integración de imágenes del sensor MODIS y cartografía temática para la simulación de modelos geoespaciales para obtener zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa, México.** 2014. 155 (Msc). Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán.

BENAVIDES MORA, V.; TARLÉ PISSARRA, T. C.; GALBIATTI, J. A. Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño - Colombia. **Ingeniería e Investigación**, v. 29, p. 97-101, 2009.

BRAVO PEÑA, L. C. et al. **Tendencias temporales del índice mejorado de la vegetación (EVI) en cinco coberturas naturales del occidente, norte y noroeste de México durante el periodo 2000-2013.** Memorias de la XX Reunión Nacional del SELPER-México: 6 p. 2013.

CABRERA, M.-W. R. **Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación.** Bogotá: 2014. 296 ISBN 978-958-8889-00-9.

CAMACHO, J. H.; SAMPER, D.; OCCIDENTE, B. D. **Desiertos: zonas áridas y semiáridas de Colombia.** Cali: Banco de Occidente Credencial, 1995. ISBN 958-95504-6-0.

CASTRO AVARIA, C. et al. Detección del área con desierto florido en el territorio del Mar de Dunas de Atacama, mediante percepción remota. **Revista de geografía Norte Grande**, p. 103-121, 2014.

COGOLLOS HERNÁNDEZ, A. M.; PRIETO GUTIERREZ, A. M. **Aporte al estado de la desertificación en el municipio de Villa de Leyva (Boyaca)**. 2004. La Universidad, Bogotá D. C. , Colombia :.

CORPOBOYACÁ. **Atlas geográfico y ambiental** [Colombia]: Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2015. ISBN 9789585856653.

CORREDOR, J. J. V.; CAMARGO, C. A. C.; GUERREO, E. F. M. Efectos de los fenómenos macroclimáticos (El Niño y La Niña) sobre diferentes variables, climatológicas en Boyacá. **In Vestigium Ire**, v. 1, n. 1, 2008.

CHACÓN, E. **Patrones fenológicos de vegetación de los Llanos del Orinoco, Venezuela, a través de análisis de series de tiempo de imágenes NOAA**. VII Conferencia Iberoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica. Mérida - Venezuela: 17 p. 1999.

CHANGZHEN, Y.; TAO, W.; ZHIWEN, H. Using modis data to assess land desertification in Ordos Plateau -- Mu Us Sandy Land case study. Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05., 2005. 25-29 July 2005. p.2373-2375.

CHEN, L. et al. Development of a new index for integrating landscape patterns with ecological processes at watershed scale. **Chinese Geographical Science**, v. 19, n. 1, p. 37-45, 2009/03/01 2009.

CHENG, G.-D.; XIAO, D.-N.; WANG, G.-X. Characteristics and construction of landscape ecology in arid regions. **Chinese Geographical Science**, v. 10, n. 1, p. 13-19, 2000/03/01 2000.

DANE, D. A. N. D. E.-. **Encuesta Nacional Agropecuaria - ENA**. DANE. Bogotá, p.72. 2014

ESCALANTE, A.; GRANDE, C. Análisis de la cobertura vegetal del Área Metropolitana de San Salvador y determinación de Índices de cobertura vegetal del municipio de Antiguo Cuscatlán. 2011.

FAGUA, J. C.; POSADA, E. **Evaluación Temporal del Proceso de Desertificación en el Enclave Seco Andino de Villa de Leyva, Departamento de Boyacá (Colombia) empleando NDVI de MODIS**. Bogotá D.C.,:Colombia: IGAC, 2013. ISBN 0120-8551.

FANG, L. et al. Sandy desertification change and its driving forces in western Jilin Province, North China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 136, n. 1, p. 379-390, 2008.

FENG, X. et al. Remote sensing of ecosystem services: An opportunity for spatially explicit assessment. **Chinese Geographical Science**, v. 20, n. 6, p. 522-535, 2010/12/01 2010.

FRAU, C. M. et al. Caracterización y monitoreo de paisaje semiárida en la Región del Maule mediante datos satelitales. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 6, p. 660-668, 2010.

GAITÁN, J.; DONALDO BRAN, D.; AZCONA, C. Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y limitaciones. **Agriscientia**, v. 32, n. 2, p. 83-93, 2015.

GAO, X. et al. Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 3, p. 609-620, 2000/12/01/ 2000.

GINER, C. et al. Tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en la España peninsular (2000-2009). **Revista de Teledetección**, v. 38, p. 51-64, 2012.

GÓMEZ SIERRA, F. A. **El éxtasis del colibrí huella y guía cultural de la vid y le vino. El caso del "Marqués de Villa de Leyva"**. 2013. ISBN 2389-9638.

GONZÁLEZ-M., R.; LÓPEZ-CAMACHO, R. Catálogo de las plantas vasculares de Ráquira (Boyacá), flora andina en un enclave seco de Colombia. **Colombia Forestal**, v. 15, p. 55-103, 2012.

GROOM, G. et al. Remote Sensing in Landscape Ecology: Experiences and Perspectives in a European Context. **Landscape Ecology**, v. 21, n. 3, p. 391-408, 2006/04/01 2006.

HERNÁNDEZ LEAL, P. A. **Análisis espacio-temporal de la desertificación usando los sensores NOAA-AVHRR y Landsat –TM**. 2006. 241 Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas, Universidad de la Laguna, La Laguna - Tenerife - Islas Canarias - España.

HIRCHE, A. et al. Landscape changes of desertification in arid areas: the case of south-west Algeria. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 179, n. 1-4, p. 403-420, 2011/08/01 2011.

HORI OCHOA, M. D. C. Variabilidad de las respuestas espectrales de acuerdo a los cambios fenológicos de la vegetación del anticlinorio de Artega, Coahuila y Nuevo Leon, Mexico. 1998.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 195-213, 2002/11/01/ 2002.

IGAC-UPTC. **Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Boyacá**. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi." Subdirección Agrológica Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2005. ISBN 9789589067949.

IGAC. **Boyacá: características geográficas**. Bogota, D.E.: Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Geografía, 1990. 149 p.

IGAC;; IDEAM;; MAVDT. **Protocolo de degradación de suelos y tierras por desertificación**. Bogotá: 152 p. 2010a.

IGAC;; IDEAM;; MAVDT. **Protocolo de degradación de suelos y tierras por erosión**. Bogotá: 225 p. 2010b.

IGAC;; IDEAM;; MAVDT. **Protocolo de degradación de suelos y tierras por salinización**. Bogotá: 312 p. 2010c.

LAMCHIN, M. et al. Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. **Advances in Space Research**, v. 57, n. 1, p. 64-77, 2016/01/01/ 2016.

LATORRE, M. L. et al. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. **Espaço e Geografia**, v. 6, p. 91 - 121, 2003.

LEYVA, M. D. V. D. **Plan de desarrollo municipal 2016 - 2019** 2016.

LIRA, J. A Model of Desertification Process in a Semi-arid Environment Employing Multi-spectral Images. In: SANFELIU, A.; MARTÍNEZ TRINIDAD, J., *et al* (Ed.). **Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications**: Springer Berlin Heidelberg, v.3287, 2004. cap. 31, p.249-258. (Lecture Notes in Computer Science). ISBN 978-3-540-23527-9.

LIU, A. X. et al. Monitoring of desertification in central Asia and western China using long term NOAA-AVHRR NDVI time-series data. IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), 2003. 21-25 July 2003. p.2278-2280 vol.4.

LÓPEZ, M. V.; ARRÚE, J. L.; GRACIA, R. **CONTROL DE LA EROSIÓN EÓLICA EN SUELOS AGRÍCOLAS**. Estación Experimental de Aula Dei, Departamento de Suelo y Agua. Zaragoza. 2010

MADR. Agronet. p. Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano que centraliza información y servicios, para la toma de decisiones de productores y usuarios del sector., 2017. Disponible em: <
<http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>>.

MARRUBIO, P. M. La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje. **GeoFocus**, n. 4, p. 1-24, 2004.

MARTÍNEZ, T. L.; VICENTE-SERRANO, S. M.; ROMO, A. Influencia de la topografía en la estacionalidad de la actividad vegetal: análisis en el Pirineo occidental aragonés a partir de imágenes NOAA-AVHRR. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, n. 38, 2004.

MAS, J. F. C. **Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio**. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología, 2011. ISBN 9786077908555.

MATA, G. D. D. L.; ÁLVAREZ, A. P.; GUERRERO, J. H. M. Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. **Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía**, v. 2014, n. 84, p. 42-53, 2014.

MELÉNDEZ PASTOR, I. et al. **nálisis de series temporales de vegetación obtenidas mediante teledetección como herramienta para el seguimiento de procesos de desertificación. Avances en estudios sobre desertificación: aportaciones al Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. Thornes**. Murcia: 339-342 p. 2009.

MÉNDEZ GONZÁLEZ, J.; NÁVAR CHÁIDEZ, J. D. J.; GONZÁLEZ ONTIVEROS, V. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. **Investigaciones geográficas**, p. 38-55, 2008.

MOLANO, B. J. **Villa de Leiva: ensayo de interpretación social de una catástrofe ecológica**. Fondo FEN Colombia, 1990.

MONCADA RASMUSSEN, D. M. Análisis espacio-temporal del cambio en los bosques de roble (*Quercus humboldtii* bonpl.) y su relación con la alfarería en Aguabuena, (Ráquirá – Boyacá). **2010**, v. 13, n. 2, p. 24, 2010-12-31 2010.

MORA, D. J., JOSÉ ULISES; FÁBREGA, JOSÉ. Relación Entre el Índice de Área Foliar y el Índice Normalizado de Vegetación en el Bosque Húmedo Tropical de Panamá en Gamboa. **I+D Tecnológico, Universidad Tecnológica de Panamá.**, v. 10, p. 28-40, 2014.

MOREIRA, A. A. **Análise da seca/estiagem no norte do Estado de Minas Gerais a partir de dados MODIS**. 2016. 124 (Msc). IGEO, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre.

MOSENA, M. **Agricultura em áreas frágeis : as transformações decorrentes do processo de arenização em São Francisco de Assis/RS**. 2008. 174 (MsC.). Faculdade de Ciências Econômicas. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural., Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre.

MURILLO, P. et al. Monitoring sugarcane crops in the Cauca river valley (Colombia), using MODIS satellite images. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technology**, v. 27, p. 1-5, 2010.

NOAA. Cold and warm episodes by season College Park, Maryland, 2015. Disponible em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml>.

OROZCO FILHO, J. C. Análise de imagens de séries temporais NDVI do sensor Modis na microrregião de Vilhena. 2015.

PACHECO, K. G. M. **Prácticas agropecuarias coloniales y degradación del suelo en el Valle de Saquencipá, Provincia de Tunja, siglos XVI y XVII.** 2012. 91 (MSc). Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales - IDEA, Universidad Nacional de Colombia - UNAL., Bogotá D.C.

PÉREZ, Y. M. **Evaluación de la desertificación en la cuenca del Río Mizque utilizando herramientas de análisis multicriterio.** 2013. 56 (MSc). Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.

PETTA, R. A. et al. Evaluation of Desertification Processes in Seridó; Region (NE Brazil). **International Journal of Geosciences**, p. 12-17, 2013.

PRECIADO, S.; MIGUEL, J.; COCERO MATESANZ, D. Los sig raster: herramienta de análisis medioambiental y territorial. 2008.

RUEDA CALIER, F. et al. Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada). **Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, v. 16, p. 25-40, 2015.

SÁNCHEZ-FLORES, E.; RODRÍGUEZ-GALLEGOS, H.; YOOL, S. R. Plant invasions in dynamic desert landscapes. A field and remote sensing assessment of predictive and change modeling. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 3, p. 189-206, 2008.

SHAO, G.; WU, J. On the accuracy of landscape pattern analysis using remote sensing data. **Landscape Ecology**, v. 23, n. 5, p. 505-511, 2008/05/01 2008.

SINGH, J. S. et al. Application of landscape ecology and remote sensing for assessment, monitoring and conservation of biodiversity. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 38, n. 3, p. 365-385, 2010/09/01 2010.

SOUZA, B. I. D. S., D. M. A. . Desertificação: Considerações sobre o estado atual do conhecimento e a repartição do processo. **Boletim Gaúcho de Geografia, Associação dos Geógrafos Brasileiros.**, v. 30, p. 46-57, 2006.

SPONSELLER, R.; FISHER, S. Drainage Size, Stream Intermittency, and Ecosystem Function in a Sonoran Desert Landscape. **Ecosystems**, v. 9, n. 3, p. 344-356, 2006/04/01 2006.

UNCCD, U. N. C. T. C. D.-. **Intergovernmental negotiating committee for the elaboration of an international convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought andor desertifcation, particularly in Africa**. New York, USA 1994.

UNESCO. **Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Dentro del marco del proyecto "Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe"**. Documentos Técnicos del PHI-LAC: CAZALAC. 25 2010.

VÁSQUEZ, A., BUITRAGO, A. C. , Ed. **El gran libro de los páramos**. Bogotá, p.208ed. 2011.

VÁZQUEZ, P.; ADEMA, E.; FERNÁNDEZ, B. Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. **Ecología austral**, v. 23, n. 2, p. 77-86, 2013.

VERDUM. R et al. **Desertificação: Questionando as Bases Conceituais, Escalas de Análise e Consequências**. 2009.

VERMOTE, E. **MODIS Surface Reflectance User's Guide**. E. F. VERMOTE, S. Y. K. A. J. P. R.: MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility 2011.

VILLEGAS, A. E. S. **Molinos de trigo en la Nueva Granada: siglos XVII-XVIII : arquitectura industrial, patrimonio cultural inmueble**. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2004. ISBN 9789587014273.

WANG, H.; MA, M.; GENG, L. Monitoring the recent trend of aeolian desertification using Landsat TM and Landsat 8 imagery on the north-east Qinghai–Tibet Plateau in the Qinghai Lake basin. **Natural Hazards**, p. 1-20, 2015/08/05 2015.

WANG, J. et al. A Multi-sensor View of the 2012 Central Plains Drought from Space. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. 45, 2016-June-20 2016.

XIAOFENG, D. et al. Analysis of the landscape change at River Basin scale based on SPOT and TM fusion remote sensing images: a case study of the Weigou River Basin on the Chinese Loess Plateau. **International Journal of Earth Sciences**, v. 98, n. 3, p. 651-664, 2009/04/01 2009.

XU, D.; LI, C.; SONG, X. The Research of the Quantitative Method of Desertification Assessment at Large Scale Based on MODIS Data and Decision Tree Model - A Case Study in Farming-Pastoral Region of North China. 2012 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2012. 1-3 June 2012. p.1-4.

ZHANG, C.; NIU, S.; XU, D. Monitoring of Desertification in Inner Mongolia Based on MODIS Data. 2010 Third International Conference on Information and Computing, 2010. 4-6 June 2010. p.322-324.

ANEXOS

Anexo 1: Valores do diagrama de caixa para o os perfis anuais do NDVI.

	Mês	Mínimo	1er Q	Media	3er Q	Máximo
área_1	1	0,651	0,738	0,748	0,771	0,789
	2	0,591	0,697	0,724	0,753	0,791
	3	0,618	0,693	0,720	0,748	0,779
	4	0,673	0,717	0,738	0,758	0,790
	5	0,682	0,726	0,744	0,765	0,789
	6	0,663	0,722	0,743	0,769	0,791
	7	0,684	0,708	0,730	0,749	0,778
	8	0,648	0,702	0,716	0,738	0,760
	9	0,636	0,699	0,714	0,739	0,759
	10	0,666	0,728	0,736	0,753	0,780
	11	0,705	0,745	0,756	0,769	0,785
	12	0,726	0,759	0,768	0,781	0,801
área_2	1	0,336	0,378	0,420	0,447	0,516
	2	0,328	0,363	0,398	0,430	0,504
	3	0,338	0,361	0,403	0,430	0,485
	4	0,364	0,413	0,429	0,455	0,487
	5	0,350	0,420	0,447	0,486	0,503
	6	0,314	0,410	0,436	0,470	0,517
	7	0,302	0,386	0,418	0,461	0,504
	8	0,318	0,362	0,397	0,431	0,470
	9	0,330	0,380	0,399	0,413	0,467
	10	0,370	0,398	0,423	0,441	0,475
	11	0,372	0,423	0,444	0,473	0,495
	12	0,374	0,428	0,450	0,478	0,519
área_3	1	0,165	0,190	0,230	0,258	0,334
	2	0,163	0,190	0,221	0,253	0,306
	3	0,173	0,190	0,227	0,264	0,301
	4	0,188	0,210	0,246	0,285	0,324
	5	0,195	0,225	0,262	0,294	0,328
	6	0,181	0,234	0,255	0,278	0,311
	7	0,162	0,218	0,236	0,256	0,311
	8	0,145	0,201	0,217	0,238	0,284
	9	0,153	0,200	0,214	0,227	0,294
	10	0,171	0,212	0,230	0,249	0,302
	11	0,182	0,217	0,245	0,270	0,315
	12	0,187	0,220	0,253	0,287	0,321

Anexo 2: Valores do diagrama de caixa para o os perfis anuais do EVI.

	Mês	Mínimo	1er Q	Media	3er Q	Máximo
área_1	1	0,373	0,430	0,442	0,461	0,483
	2	0,320	0,421	0,434	0,463	0,481
	3	0,349	0,410	0,435	0,460	0,470
	4	0,415	0,427	0,446	0,464	0,479
	5	0,406	0,437	0,458	0,478	0,512
	6	0,414	0,446	0,459	0,474	0,509
	7	0,397	0,433	0,457	0,478	0,514
	8	0,378	0,422	0,454	0,493	0,519
	9	0,401	0,432	0,457	0,487	0,525
	10	0,418	0,438	0,459	0,479	0,507
	11	0,424	0,441	0,455	0,466	0,482
	12	0,421	0,437	0,456	0,474	0,500
área_2	1	0,193	0,228	0,248	0,266	0,305
	2	0,194	0,217	0,243	0,263	0,318
	3	0,190	0,223	0,248	0,266	0,300
	4	0,202	0,236	0,260	0,278	0,301
	5	0,223	0,253	0,272	0,296	0,316
	6	0,207	0,254	0,268	0,287	0,305
	7	0,204	0,251	0,261	0,283	0,303
	8	0,209	0,240	0,251	0,266	0,298
	9	0,207	0,231	0,250	0,265	0,300
	10	0,214	0,236	0,254	0,267	0,298
	11	0,212	0,249	0,261	0,275	0,290
	12	0,205	0,250	0,262	0,279	0,290
área_3	1	0,096	0,110	0,132	0,145	0,184
	2	0,097	0,111	0,131	0,146	0,180
	3	0,103	0,117	0,137	0,156	0,183
	4	0,110	0,129	0,147	0,166	0,190
	5	0,114	0,134	0,153	0,173	0,192
	6	0,105	0,137	0,148	0,165	0,181
	7	0,098	0,131	0,141	0,156	0,174
	8	0,095	0,125	0,135	0,148	0,163
	9	0,097	0,127	0,132	0,139	0,170
	10	0,103	0,127	0,136	0,147	0,172
	11	0,106	0,126	0,140	0,154	0,166
	12	0,102	0,125	0,142	0,157	0,179

Anexo 3: Porcentagens e áreas identificadas com processos de desertificação segundo o grau de erosão.

TIPO INDICE	GRAU DE EROÇÃO	Numero de pixels	Metros quadrados	Hectares	Porcentagem de área relativa 0 -1 (%)
EVI MAIO	Baixa	3155	197,1875	19718,75	0,033
	Média	6963	435,1875	43518,75	0,073
	Muito Alta	35382	2211,375	221137,5	0,370
	Sem Solo	2397	149,8125	14981,25	0,025
	Alta	9712	607	60700	0,101
	Sem erosão	38138	2383,625	238362,5	0,398
EVI DEZEMBRO	Baixa	2570	160,625	16062,5	0,042
	Média	4802	300,125	30012,5	0,079
	Muito Alta	25806	1612,875	161287,5	0,426
	Sem Solo	1754	109,625	10962,5	0,029
	Alta	11941	746,3125	74631,25	0,197
	Sem erosão	13729	858,0625	85806,25	0,227
NDVI MAIO	Baixa	1549	96,8125	9681,25	0,041
	Média	931	58,1875	5818,75	0,024
	Muito Alta	23774	1485,875	148587,5	0,624
	Sem Solo	1067	66,6875	6668,75	0,028
	Alta	5753	359,5625	35956,25	0,151
	Sem erosão	5005	312,8125	31281,25	0,131
NDVI DEZEMBRO	Baixa	227	14,1875	1418,75	0,041
	Média	50	3,125	312,5	0,009
	Muito Alta	3074	192,125	19212,5	0,552
	Sem Solo	598	37,375	3737,5	0,107
	Alta	462	28,875	2887,5	0,083
	Sem erosão	1157	72,3125	7231,25	0,208