

ÍNDICES ESPECTRAIS, DIAGNÓSTICO DA VEGETAÇÃO E DA DEGRADAÇÃO DA CAATINGA DA BACIA DO RIO TAPEROÁ-PB

Iêde de Brito Chaves

Eng. Agrônomo, doutor em agronomia, ex-professor CCA/UFPB, pesquisa em planejamento e conservação de bacias hidrográficas
iedebchaves@hotmail.com

Paulo Roberto Megna Francisco

Tecnólogo Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola, ex-professor CCA/UFPB, pesquisa em planejamento e conservação ambiental
paulomegna@ig.com.br

Eduardo Rodrigues Viana de Lima

Geógrafo, Doutor em Geografia, Professor Associado DGEOC/CCEN/UFPB, Pesquisador do CNPq, pesquisa geotecnologias no planejamento e na gestão ambiental
eduvianalima@gmail.com

Bernardo Barbosa da Silva

Meteorologista, doutor em engenharia civil, professor visitante da UFPE, especialista em agrometeorologia e sensoriamento remoto aplicado
bbdasilva.ufpe@gmail.com

Ziany Neiva Brandão

Eng. Eletrônica, doutora em Recursos Naturais - Sistema Água-Solo-Planta-Atmosfera, Analista da Embrapa Algodão, pesquisa em sensoriamento remoto voltado à agricultura de precisão
ziany.brandao@embrapa.br

Lúcia Helena Garófalo Chaves

Eng. Agrônoma, doutora em agronomia, professora titular DEAg/ CTRN/UFPG, pesquisa química e fertilidade de solos
lhgarofalo@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, que ocorre na região semiárida, localizada em grande parte na região Nordeste do Brasil. Apresenta grande diversidade de ambientes, o que propicia uma rica biodiversidade, apresentando muitas espécies endêmicas de alto valor biológico (PAN-BRASIL, 2005), ainda desconhecidas e/ou não catalogadas (Alves et al., 2009). Sua variabilidade espacial e temporal na composição e no arranjo de seus componentes botânicos é resposta aos processos de sucessão e de diversos fatores ambientais, onde a densidade de plantas, a composição florística e o potencial do estrato herbáceo variam em função das características de solo, pluviosidade e altitude (Bispo et al., 2010).

Os resultados apresentados neste capítulo dizem respeito a um estudo que foi desenvolvido na bacia hidrográfica do rio Taperoá, localizada na região do Cariri Paraibano, sobre o planalto da Borborema, área que se insere no Programa Nacional de Combate à Desertificação (PAN-Brasil). Esta, considerada com grau de desertificação grave, tendo sido escolhida pelo programa como uma das áreas-piloto, prioritária para o desenvolvimento de ações mitigadoras (BRASIL/MMA, 2005).

ESTIMATIVA DA BIOMASSA DA CAATINGA

O Bioma Caatinga caracteriza-se por apresentar grande diversidade de paisagens, principalmente quanto à densidade e ao porte das plantas (Carvalho & Freitas, 2005). Os padrões morfológicos da vegetação dependem das condições edafoclimáticas locais, podendo apresentar-se com um porte arbóreo e denso, até um subarbustivo aberto. Com frequência, em áreas mais impactadas, a densidade de plantas lenhosas diminui, predominando gramíneas e cactáceas. Um dos fenômenos mais espetaculares da Caatinga é a perda da folhagem da maioria das espécies no período de estiagem e sua exuberante recuperação no período das chuvas (Guimarães, 2009).

Modelos classificatórios específicos para a vegetação da Caatinga, baseados nos seus aspectos fisionômicos, ecológicos ou florísticos, têm sido usados, contudo, pela diversidade dos métodos e os tratamentos dos dados observados, não tem sido possível

encontrar um modelo-síntese de classificação abrangente com resultados satisfatórios (Sampaio e Rodal, 2000).

Com o objetivo de inventariar a biomassa da vegetação de Caatinga a partir de índices espectrais de imagens de satélite, Chaves et al. (2008) propuseram uma classificação morfoestrutural baseada na composição das plantas, quanto ao porte e a densidade do recobrimento do terreno (Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa - IBVL). Para uma condição de máxima preservação (caatinga arbórea muito densa), o IBVL é considerado igual à unidade. Para um mesmo ambiente edafoclimático, a biomassa lenhosa de um bosque de vegetação pode ser estimada a partir da descrição da vegetação, quanto à classe (composição dos portes) e subclasse (grau de recobrimento da superfície).

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E SENSORIAMENTO REMOTO

No domínio do semiárido, estudos da vegetação e uso da terra vêm sendo desenvolvidos, com o objetivo de obter informações a partir de imagens de satélite e de outros produtos do sensoriamento remoto, em busca de facilitar a análise e a interpretação dos dados de superfície.

A cobertura vegetal vem sendo estudada, segundo os mais diferentes níveis de abordagem, que incluem estudos taxonômicos, botânicos, fisiológicos, fitossociológicos e outros. Com a constatação de que os vegetais extraem da radiação eletromagnética emitida pelo Sol a energia de que necessitam para viver, esta subtração de energia, passou a ser um parâmetro para os estudos da vegetação a partir dos sensores elétrico-magnéticos (Ponzoni, 2001). Sendo assim, a detecção qualitativa e quantitativa da vegetação verde é uma das mais importantes contribuições do sensoriamento remoto para os estudos ambientais (Oliveira et al., 2009).

A utilização de índices de vegetação gerados de imagens de satélite se constitui em ferramentas importantes para o monitoramento das alterações naturais ou produzidas pelo homem nas superfícies continentais (Feitosa et al., 2004), pois os índices de vegetação ressaltam o comportamento espectral da vegetação, possibilitando distinguir diferentes tipos de cobertura e uso da terra (Moreira, 2005).

A importância do sensoriamento remoto como ferramenta para avaliar os processos de desertificação fica mais evidente quando se verifica que, em escala global, um dos quatro indicadores utilizados pela ONU para avaliar o problema são os índices

de vegetação derivados de imagens de satélite, dos quais um dos mais utilizados é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI (UNITED NATIONS, 2001; Moreira, 2004; Menezes e Netto, 2001).

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Taperoá, com uma extensão territorial de 5.686,37 km², estando localizada sobre o Planalto da Borborema, na posição central do Estado da Paraíba (Figura 1). Seus pontos extremos são delimitados pelas coordenadas de 6^o51'44" e 7^o34'31" de latitude sul e 36^o00'10" e 37^o14'30" de longitude oeste. A bacia hidrográfica confronta-se ao norte com a bacia do rio Seridó, que drena para o Rio Grande do Norte; a nordeste com as bacias do rio Jacú e Curimataú; a leste com a sub-bacia do Médio Paraíba; ao sul com a bacia do Alto Paraíba (da qual faz parte) e a sudoeste com a bacia do rio Pajeú, no Estado de Pernambuco. O rio Taperoá, de regime intermitente, nasce na Serra do Teixeira e deságua no açude Presidente Epitácio Pessoa (Boqueirão), no município de Cabaceiras, percorrendo uma extensão de aproximadamente 145 km.

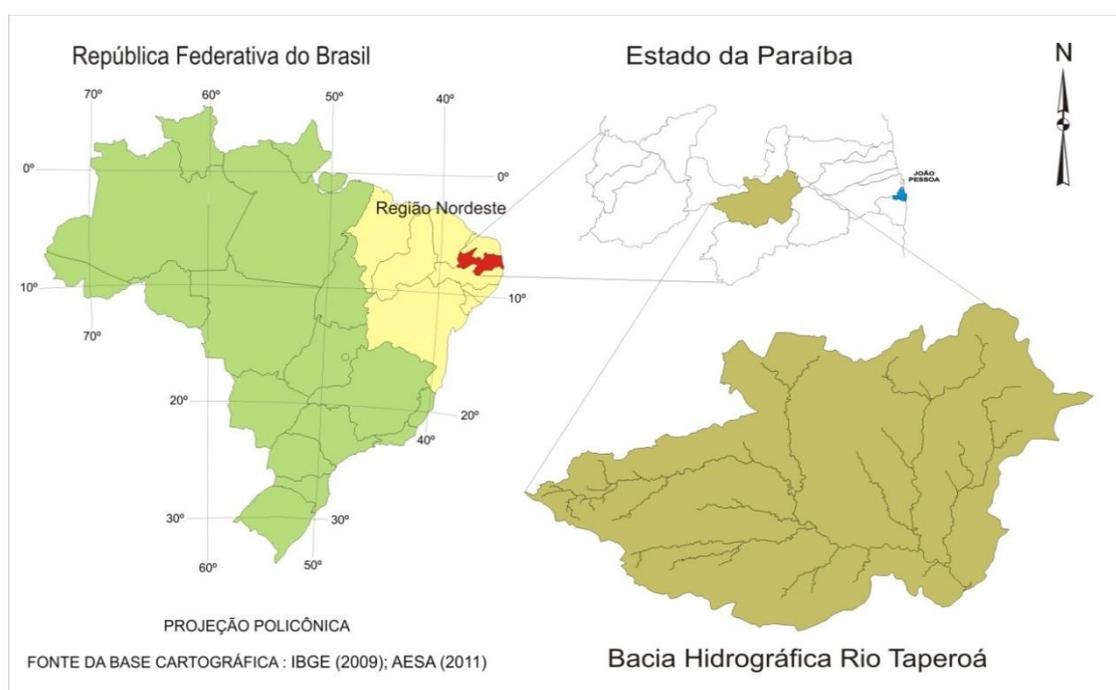


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Francisco (2013).

Em toda a área a vegetação é do tipo Caatinga hiperxerófila. A bacia apresenta, em grande parte, um relevo suave ondulado e altitudes variando de 300 a 600 m (Figura 2). A depressão da drenagem voltada para sudeste facilita a penetração das massas atlânticas e à medida que se eleva o terreno, ocorre um gradiente adiabático uniforme, fazendo baixar a temperatura e aumentar a precipitação.

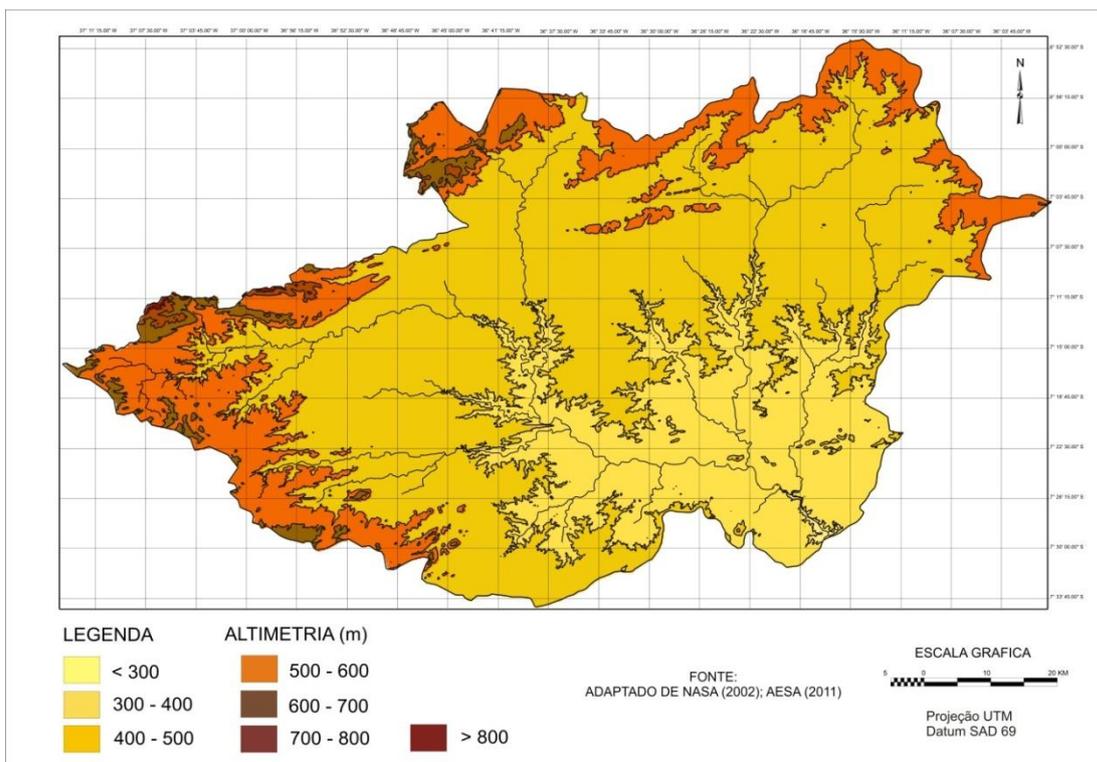


Figura 2. Mapa hipsométrico da área de estudo. Fonte: Francisco (2013).

Os solos que ocorrem com maior predominância (Figura 3), nas áreas mais elevadas da bacia são: o Planossolo Nátrico e o Neossolo Regolítico eutrófico, ambos com relevo plano e suave ondulado, no terço a nordeste; e no sudoeste o Neossolo Litólico eutrófico fase pedregosa substrato gnaisse e granito. No terço médio e mais rebaixado da bacia ocorre o Luvisolo Crômico vértico fase pedregosa relevo suave ondulado (BRASIL, 1972; PARAÍBA, 1978).

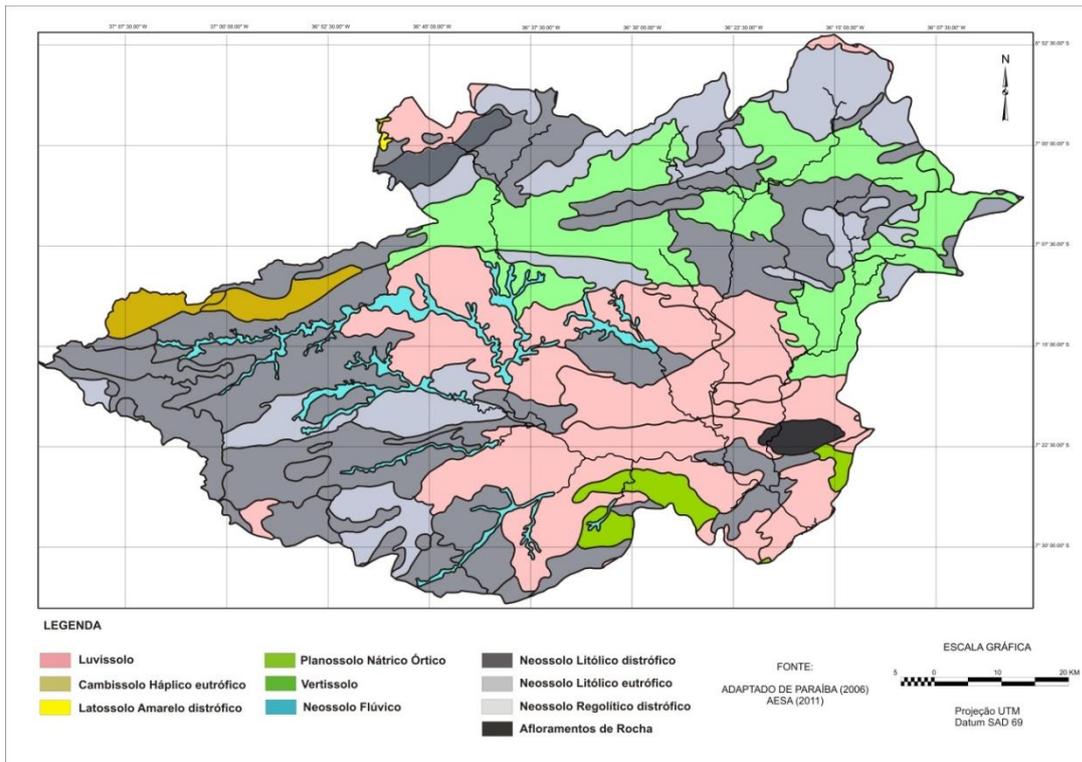


Figura 3. Mapa de solos da área de estudo. Fonte: Francisco (2013).

BASE DOS DADOS

Visando a classificação da vegetação utilizou-se de forma auxiliar as imagens do programa Google Earth, onde foram pré-selecionados pontos de observação com diferentes padrões de vegetação, representativos dos tipos de uso e cobertura da terra nas três principais unidades de mapeamento de solos da bacia. Com a complementação de trabalhos de campo, procurou-se obter pelo menos 4 repetições para cada padrão de cobertura de vegetação e uso da terra (áreas agrícolas, campos de pastagens, algarobais e culturas permanentes – capineiras, palma forrageira e campos de sisal). Cada área de observação e coleta de material foi devidamente descrita e georreferenciada.

A época da coleta dos dados foi no final do período seco, em novembro do ano de 2011, ocasião em que a vegetação está sem folhagem, condição que uniformiza comparativamente as unidades de observação, e o manto herbáceo-graminóide está bem reduzido, facilitando o deslocamento e a visualização do conjunto arbustivo-arbóreo. Por outro lado, neste período a identificação de algumas espécies fica dificultada pela ausência das folhas e flores, órgãos característicos identificadores das plantas.

No campo, os alvos foram identificados e a descrição das unidades de observação foram feitas de acordo com a metodologia proposta por Chaves et al. (2008), também utilizada por Oliveira (2009), Guimarães (2009) e Francisco (2013).

Foram utilizadas imagens do sensor TM do satélite LANDSAT 5, órbita 215 ponto 65, das datas de 28/10/2009 e 24/05/2010, que correspondem aos dias Julianos (DJ) 301 e 144; com horário de captura de 12:25:28 e 12:25:59; elevação solar de 63.9934 e 50.3096 e ângulo $\cos Z$ de 0,8987 e 0,7695, respectivamente.

Para o processamento das imagens digitais utilizou-se o software SPRING, criando-se uma base de dados georreferenciada. Em seguida, as imagens foram importadas para o software ERDAS e empilhadas. A correção radiométrica das diferentes bandas espectrais foi feita utilizando o algoritmo empregado por Silva et al. (2005), e depois foram geradas imagens índice de vegetação NDVI, SAVI e EVI, conforme a descrição de Allen et al. (2002).

Para cada imagem índice de vegetação (NDVI, SAVI e EVI) e as imagens das bandas 3 e 4 dos períodos úmido e seco, foram lidos os valores de 6 pixels de cada ponto de observação georreferenciado no campo, estabelecendo-se assim um valor médio representativo para cada alvo. Para os dados correspondentes à vegetação de Caatinga, dos períodos seco e úmido, foram estabelecidas correlações com os valores do IBVL, estabelecendo-se assim curvas teóricas de correlação entre este e os índices de vegetação utilizados, assim como com a reflectância das bandas 3 e 4.

RESULTADOS E OBSERVAÇÕES

AVALIAÇÃO DA REFLETÂNCIA E DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

As leituras do período úmido

Para todos os índices de vegetação (Figura 4) as correlações foram mais baixas no período úmido, denotando esta ser uma época inadequada para trabalhos de classificação e mapeamento da vegetação da caatinga. Muitos trabalhos que correlacionam índices espectrais com biomassa da vegetação de caatinga tem adotado o período seco para coleta de informações (Maldonado, 1999; Guimarães, 2009; Francisco 2013).

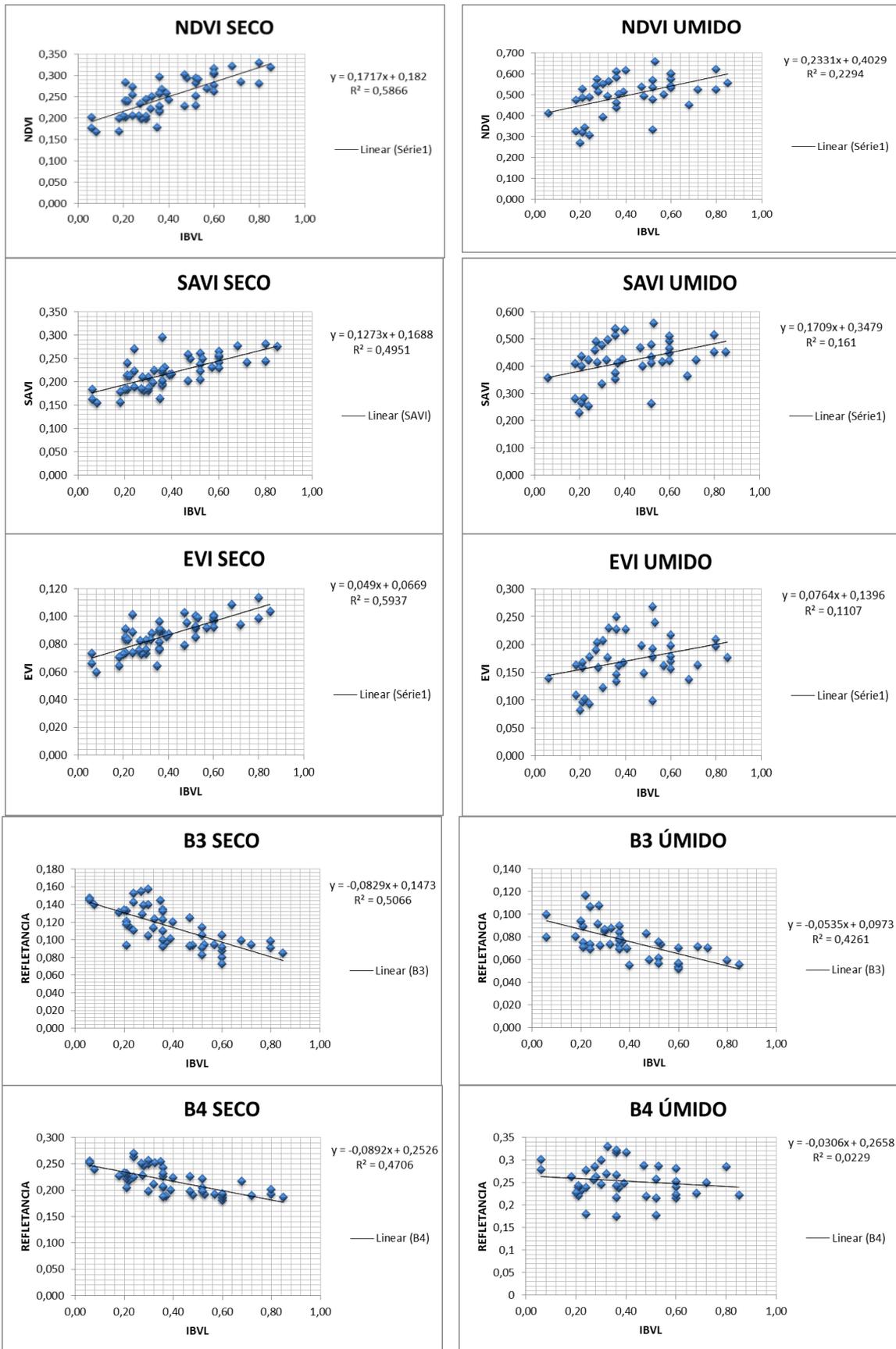


Figura 4. Equação de regressão do IBVL com os índices de vegetação (NDVI, SAVI e EVI) e as Bandas 3 e 4.

Os valores dos índices NDVI, SAVI e EVI e da biomassa (IBVL) apresentam uma correlação direta, tanto para o período seco, como para o período úmido (Figura 4). Enquanto que os valores de refletância da banda TM3 são menores que os da banda TM4 e decrescem com o aumento do volume da biomassa (IBVL). Ao contrário do que mostra a literatura (Maldonado, 1999), a refletância da vegetação de caatinga no período úmido na banda TM4 (vegetação fotossinteticamente ativa), não sofreu grande alteração devido ao aumento da biomassa da caatinga. Os dados mostram uma leve tendência de declínio e uma grande dispersão de respostas espectrais para uma ampla faixa de classes de biomassa, fato corroborado pela baixa correlação entre as variáveis ($R^2 = 0,0229$).

Na região espectral do infravermelho próximo (banda TM4), uma vegetação verde e sadia é caracterizada por alta refletância, alta transmitância e baixa absorvância quando comparada com a região do visível (banda TM3), o que reforça a explicação sobre os altos valores para os pixels nas imagens-índice do período úmido (Rosendo, 2005). Kazmierczak 1993, citado por Maldonado (1999), observou para condição de clima semiárido, que a banda TM4 responde rapidamente ao começo da época úmida, atingindo valores quase tão altos quanto os da floresta tropical e, radiometricamente, de forma inversa a banda TM3.

Observa-se que é a banda TM3, para o período úmido (Figura 4), o parâmetro que melhor discrimina as classes de biomassa, com um coeficiente de determinação de 0,4261 e correlação de 0,65. Este, de alguma forma, vem a influenciar os dados dos demais índices espectrais estudados, uma vez que aqueles dependem da diferença entre as bandas TM4 e TM3. No geral, se pode constatar que os valores de refletância da banda TM3 são decrescentes com o aumento da biomassa, variando de 0,10 a 0,06 no período úmido enquanto que os da banda TM4 são ligeiramente decrescentes e mais altos, variando de 0,27 a 0,24.

Considerando que os índices NDVI, SAVI e EVI levam em consideração as diferenças entre os valores de refletância das bandas TM3 e TM4, observa-se, para o período úmido (Figura 4), que muitas das áreas com vegetação aberta com valores de IBVL variando de 0,200 a 0,400, apresentam valores de NDVI, SAVI e EVI iguais ou maiores do que os da vegetação de maior porte e mais densa, com IBVL 0,800 e 0,850. Esse resultado confirmam as observações feitas por Maldonado (1999; 2005) que, na

Caatinga, a recomposição da vegetação se dá de forma rápida com a chegada das primeiras chuvas.

No período úmido áreas com vegetação arbustivo-arbórea mais abertas e com solos férteis e conservados, apresentam o manto herbáceo e graminóide, com plantas colonizadoras como o Matapasto (*Chromolaena maximiliani*. Schrad) e o Marmeleiro (*Croton blanchetianus*. Baill) que recobrem os espaços entre as árvores. Essas plantas, por serem jovens e terem alta capacidade fotossintética, absorvem mais energia luminosa (banda TM3), apresentando refletância semelhante ou até superior a de áreas com vegetação adulta, arbórea e mais densa.

Os baixos valores dos índices NDVI, SAVI e EVI, para o período úmido (Figura 4), para alguns pontos com IBVL em torno de 0,20, representam áreas degradadas. Neste caso, áreas com solos degradados perdem a capacidade de restabelecimento da cobertura vegetal, apresentando aumento da refletância da banda TM 3. Observações semelhantes foram feitas por Francisco et al. (2012) avaliando a influência da umidade antecedente nas leituras do NDVI. Esta também é uma técnica de identificação de áreas degradadas utilizada na modelagem da desertificação pelo programa DesertWatch Extention Project (Desertwatch, 2012).

As leituras do período seco

No período seco (Figura 4) as correlações dos índices de vegetação com o IBVL são mais altas que no período úmido, sendo positivas para NDVI, SAVI e EVI, e negativas para as bandas TM3 e TM4, fato demonstrado pela menor dispersão dos dados e seus respectivos coeficientes de determinação. O período seco tem se consagrado como a melhor época para se realizar o diagnóstico e o mapeamento da vegetação de Caatinga, conforme constatado também por Guimarães (2009), Oliveira et al. (2009), Lopes et al. (2010) e Chaves et al. (2012).

O EVI e o NDVI apresentaram os coeficientes de correlações mais altos, com os valores do IBVL, de 0,7705 e 0,7659, respectivamente. Resultados semelhantes foram também encontrados por Oliveira et al. (2009). Considerando a faixa mais ampla dos valores do NDVI (0,180 a 0,340), do que os do EVI (0,068 a 0,108, em relação aos valores de referência do IBVL (0,05 a 0,85) optou-se por trabalhar com o NDVI, visando facilitar a discriminação dos limites das classes de vegetação, além de que, o NDVI é, reconhecidamente, o índice de mais ampla utilização.

Morais et al. (2011), trabalhando em área de transição de caatinga bem preservada no município de Floresta (PE), encontraram valores de NDVI variando de 0,208 a 0,803. Valores de NDVI abaixo de 0,4 para o período seco são mais compatíveis para respostas da vegetação de caatinga hiperxerófila, como a da área de estudo (Paixão et al., 2009; Lopes et al., 2010; Chaves et al., 2012).

Uma vez que os índices de vegetação são muito sensíveis à atividade fotossintética e as espécies de caatinga apresentam diversos mecanismos adaptativos à captação e uso da água (Coppin et al., 2004; Maldonado, 2005), a detecção de mudanças da vegetação de Caatinga, pode, muitas vezes, estar influenciada por diferenças das condições de umidade. Francisco et al. (2012) observaram, numa análise temporal da vegetação na bacia do rio Taperoá, falsas mudanças influenciadas pela variação das condições de umidade. Neste sentido, qualquer trabalho com vegetação de caatinga deve ter um rigoroso controle dos dados de umidade. Quanto maior a área de estudo, mais difícil torna-se este controle, uma vez que os postos de registros pluviométricos são normalmente esparsos e é alta a variabilidade da distribuição espacial das precipitações na caatinga.

DISCRIMINAÇÃO DA VEGETAÇÃO E DO USO DA TERRA

Influência do Período Estacional

Confrontando-se os dados da biomassa lenhosa (IBVL) obtidos das observações de campo, com os valores do NDVI para o período seco, foi feita a segmentação das classes, estabelecendo-se limites inteiros para as classes de vegetação (IBVL) e estimando-se, pela equação da correlação, os valores limites teóricos de NDVI, conforme apresentados na Tabela 1. Além das classes água e solo exposto, foi possível se estabelecer sete classes de vegetação com valores crescentes de biomassa e denominações baseadas na nomenclatura das classes descritas da metodologia proposta por Chaves et al. (2008).

Tabela 1. Classes de NDVI correspondentes aos índices de biomassa (IBVL) da vegetação de Caatinga para a época seca

Classes	IBVL	NDVI
Arbórea Subarbórea densa	> 0,60	>0,300
Subarbórea Arbustiva densa	0,50 a 0,60	0,285-0,300
Arbustiva Subarbórea densa	0,40 a 0,50	0,265-0,285
Arbustiva Subarbórea aberta	0,30 a 0,40	0,250-0,265
Arbustiva Subarbustiva aberta	0,20 a 0,30	0,225-0,250
Subarbustiva Arbustiva rala	0,10 a 0,20	0,180-0,225
Subarbustiva Arbustiva muito rala	0,05 a 0,10	0,150-0,180
Solo exposto	< 0,05	0-0,150
Corpos d'água	-	<0

Para o período seco, as áreas agrícolas e de pastagens, os campos com lavouras de agave e palma forrageira, bem como os plantios de algaroba, comuns na região, se confundem com o amplo espectro de respostas de vegetação de caatinga (Figura 5).

Apenas plantio de palma e de sisal mais vigorosos, e bosques mais densos de algarobeiras que ocorrem ao longo dos canais de drenagem podem ser identificados, pois apresentam valores de NDVI mais altos do que a caatinga arbórea muito densa e densa. Observação semelhante também foi feita por Guimarães (2008).

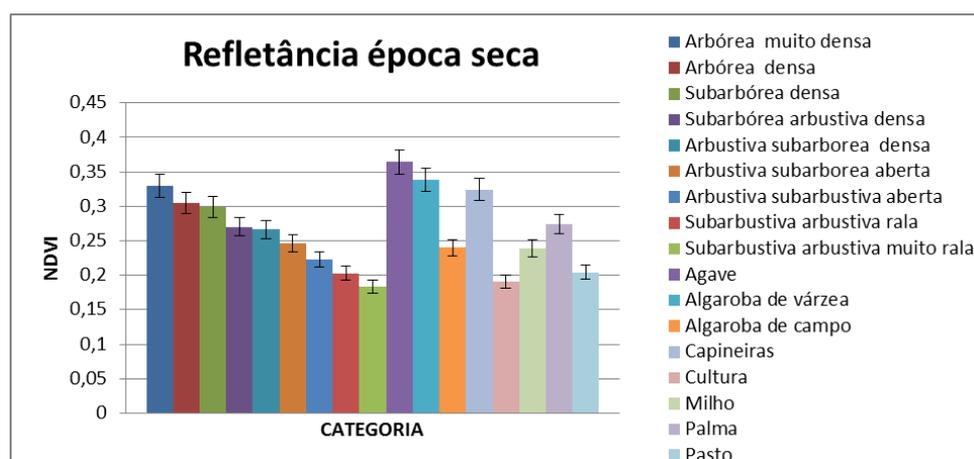


Figura 5. Valores de NDVI do período seco referentes a classes de vegetação de Caatinga e culturas agrícolas identificadas na área de estudo.

Para o período úmido (Figura 6), os valores de NDVI da vegetação de Caatinga praticamente dobraram, para todas as classes, enquanto que culturas permanentes como o agave, a algaroba de várzea e capineiras, fotossinteticamente ativas no período seco, tiveram, proporcionalmente, um ganho menor. A resposta destacada dos campos de palma, no período úmido, deve-se tanto a tonalidade mais escura de suas folhas, como a vegetação espontânea das entrelinhas, mais vigorosas e ativas neste período.

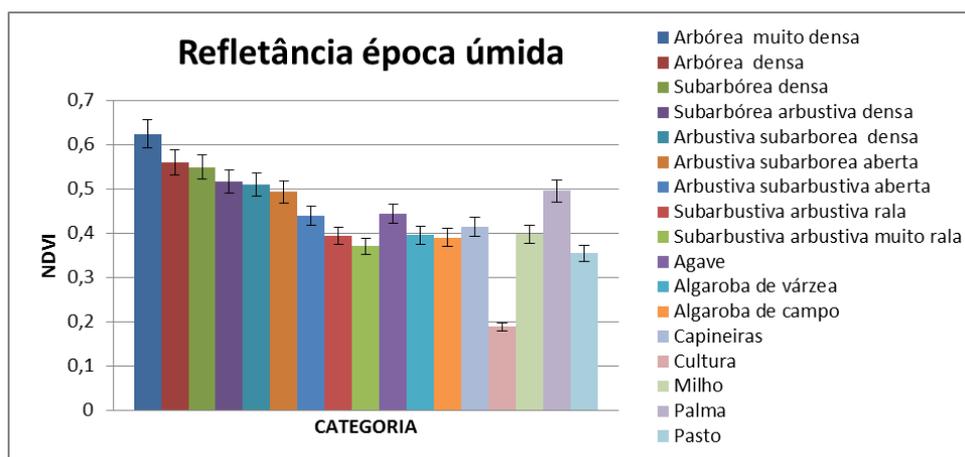


Figura 6. Valores de NDVI do período úmido referentes a classes de vegetação de Caatinga e de culturas agrícolas identificadas na área de estudo.

A classe cultura (Figuras 5 e 6) diz respeito a culturas irrigadas identificadas neste trabalho. São culturas de ciclo curto e de porte pequeno, como tomate, feijão e cebola, e de baixa densidade de recobrimento da superfície do solo, fato que pode explicar a invariabilidade e os mais baixos valores do NDVI para os dois períodos de observação. Em áreas irrigadas com culturas permanentes e de maior porte, os valores de NDVI são mais altos, superiores a 0,600, como observado em Silva et al. (2009) e Viganó et al. (2011).

Influência da Umidade Antecedente

Confrontando dados de NDVI da vegetação da bacia do rio Taperoá, para o período seco de 1996 e 2009, Chaves et al. (no prelo) observaram a influência da umidade antecedente, indicando falsas mudanças no padrão de vegetação (Figuras 7).

Analisando os dados da Tabela 2, observa-se que no ano de 1996 a precipitação anual foi bem mais baixa, em quase todos os postos pluviométricos da bacia. Em alguns postos a precipitação anual foi inferior a 400 mm.

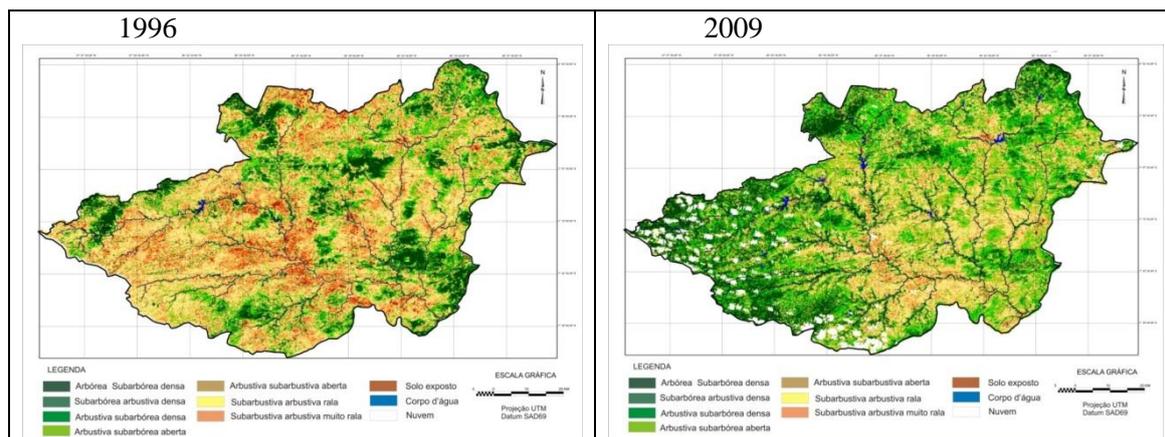


Figura 7. Mapa da cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Taperoá-PB para o período seco dos anos de 1996 e de 2009.

Da mesma forma, as precipitações dos meses antecedentes a data da imagem foram, em muitos postos, insignificantes, o que garantiria certa uniformidade da condição de umidade para a bacia. Contudo, para os postos de Cabaceiras (43,4 mm) e Junco do Seridó (46,0 mm), no mês da data da imagem, novembro, as precipitações foram expressivas. Estas precipitações no ano de 1996 favoreceram ao aumento da umidade na área com vegetação arbórea subarbórea densa, mapeadas em alguns pontos ao longo do eixo central, de sudeste (Cabaceiras) a norte (Junco do Seridó) (Figura 7). Por outro lado, a Fazenda Almas, uma área grande preservada de caatinga, uma RPPN (Reserva Particular do Patrimônio Natural) com 5.503 hectares, situada na área central do limite sudoeste da bacia, no município de São José dos Cordeiros, sofreu depleção de sua vegetação arbórea subarbórea densa, como de resto, comparativamente, toda a vegetação da área do terço sudeste da bacia.

As observações meteorológicas mostram que a variabilidade da distribuição da precipitação aumenta com a diminuição da precipitação média anual e em anos mais secos. Com a maior dimensão da área de estudo, aumenta a dificuldade de uniformização das condições de umidade, que indiretamente, afeta os resultados do diagnóstico da vegetação.

Influência da Linha do Solo

Em regiões semiáridas um dos grandes problemas é a influência secundária do solo, bem como a mistura dos espectros solo-vegetação. A refletância do solo, da

vegetação e as sombras se misturam interativamente para produzirem uma refletância composta (Richardson e Wiegand, 1990).

Tabela 2. Dados de precipitação dos três meses antecedentes das datas das imagens e dos anos 1996 e 2009, para 14 postos pluviométricos da bacia hidrográfica.

POSTOS	1996				2009			
	Set	Out	Nov	Anual	Ago	Set	Out	Anual
Boa Vista	7,2	3,8	24,0	362,4	46,2	0	0	429,8
Cabaceiras	12,1	0	43,4	396,1	66,7	2,6	0	677,8
Desterro	5,5	0	12,3	523,0	53,7	0	0	1.224,4
Gurjão	0	0	0	307,0	49,6	0	0	626,8
Juazeirinho	36,4	3,0	0	358,3	51,7	0	0	626,8
Junco do Seridó	21,0	4,0	46,0	470,2	44,2	0	0	1.085,4
Olivedos	20,0	5,3	17,0	434,2	42,3	2,8	0	567,3
Pocinhos	10,2	0	15,0	363,3	38,1	2,7	0	462,5
Serra Branca	30,3	0	17,3	520,3	47,8	0	0	777,9
Soledade/Pendência	15,5	8,1	0	409,7	61,3	0	0	1.246,7
São José Cordeiros	3,2	0	6,1	696,7	41,0	0,2	0	511,1
São João do Cariri	8,1	1,0	20,4	458,4	18,4	0	0	528,3
Taperoá	30,8	0	21,0	500,0	71,4	0	0	1.239,7
Teixeira	0	0	18,2	762,7	0	0	0	1.322,7

Fonte: AESA (2011).

Os solos normalmente refletem mais que as plantas na região do visível, e menos na região do infravermelho próximo. Solos claros refletem mais que solos escuros, ocorrendo influência também da textura, umidade, conteúdo de matéria orgânica e de minerais de ferro. Índices baseados na razão, tais como o índice de vegetação da diferença normalizada, tende a aumentar quando o solo do substrato é escuro, de baixa refletância (Tood et al., 1998; Moreira, 2005; Schucknecht et al., 2013).

Utilizando-se da diversidade dos solos da bacia do Taperoá, procurou-se analisar a influência das suas características nos dados espectrais da vegetação. Os solos predominantes da área I, Planossolo e Neossolo Regolítico (Figura 3), tem em comum a cor clara, textura arenosa e ocorrem em situação de relevo plano a suave ondulado; o da

área II é o Luvissole Crômico, com cores bruno-avermelhadas e ocorrendo em relevo suave ondulado a ondulado, e o solo da área III, com menor número de dados coletados, o Neossolo Litólico, tem cor bruno-acinzentado e ocorre em relevo ondulado.

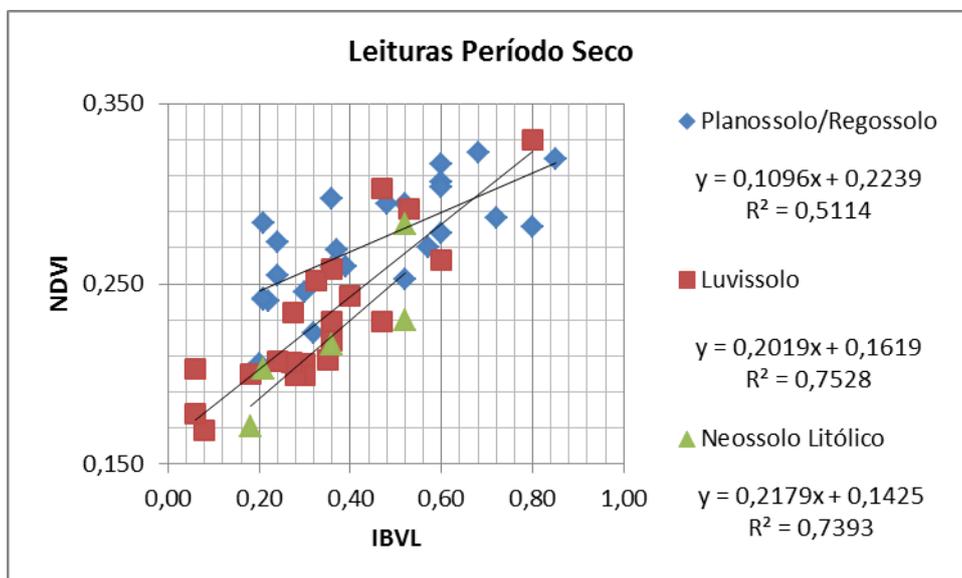


Figura 8. Equações de regressão entre o NDVI e o índice de biomassa da vegetação lenhosa de Caatinga (IBVL) para unidades de mapeamento de solos (geoambientes), na bacia hidrográfica do rio Taperoá, PB.

Analisando os dados da Figura 8, se observa que para a área I, solos claros, os valores do NDVI foram mais dispersos ($R^2 = 0,5114$) e mais altos que os das demais áreas, para os pontos com biomassa mais baixa (IBVL entre 0,2 e 0,4). Nesta situação de vegetação rala e aberta em solos claros (Planossolo e Regossolo), segundo a literatura (Todd et al., 1998), os valores da refletância na banda TM3 são mais elevados, o que faria diminuir os valores de NDVI, o que não se observou neste trabalho. Já os valores do NDVI para os mesmos padrões de vegetação, nos solos brunos avermelhados (Luvissoles) e acinzentados (Litólicos) das áreas II e III, foram mais baixos, e no conjunto, apresentaram, respectivamente, altos coeficientes de correlação, 0,8676 e 0,8598. Este é um tema que precisa ser melhor investigado, uma vez que é discordante dos resultados da literatura, e que, no conjunto dos dados, faz aumentar o erro de determinação da biomassa da vegetação.

MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA

Com base nos limites estabelecidos a partir da equação da curva teórica da correlação NDVI com IBVL, para o período seco (Figura 4), utilizando-se do programa LEGAL do SPRING, foram mapeadas as classes de vegetação e da cobertura da terra da bacia hidrográfica, conforme apresentadas na Figura 9, e calculadas as áreas correspondentes (Tabela 3).

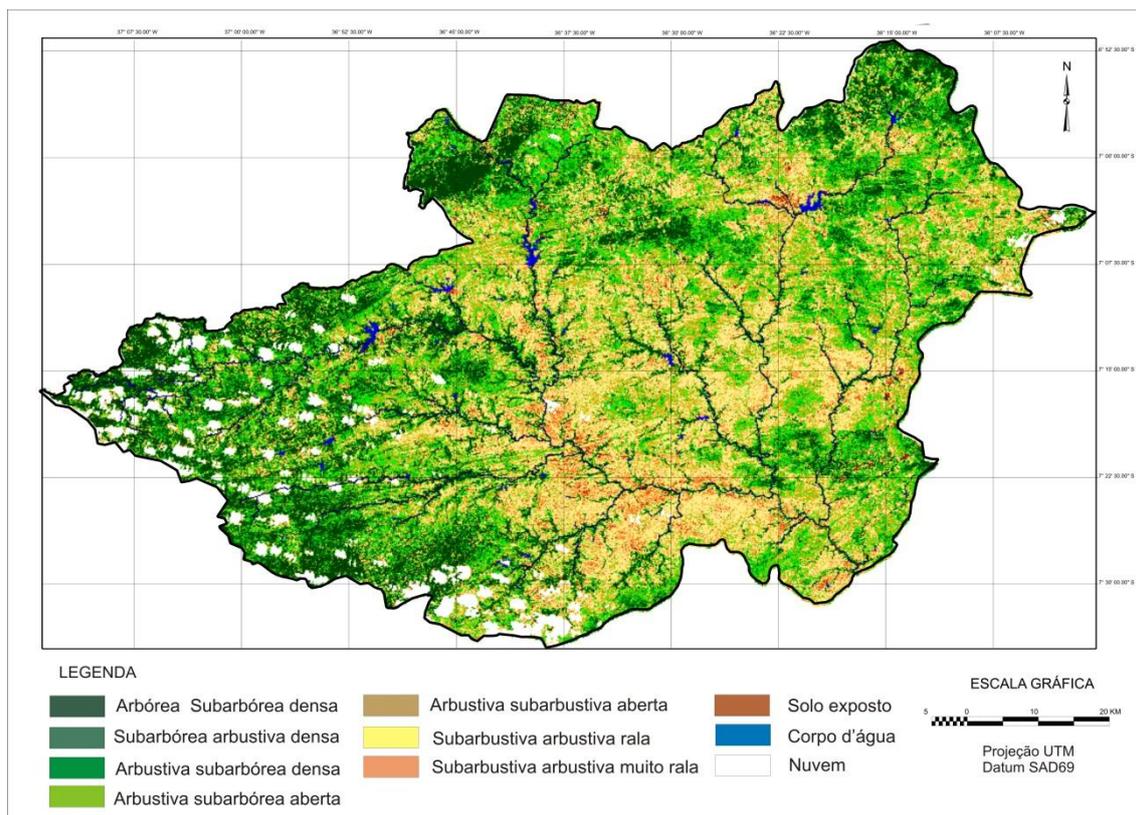


Figura 9. Mapa de tipologias de vegetação de Caatinga da bacia hidrográfica do rio Taperoá (PB).

Numa análise conjunta dos dados de vegetação da bacia hidrográfica (Figura 9), pode se observar que o terço sudoeste é onde se concentra o maior percentual de áreas com vegetação de maior porte e densidade. Fazendo uso do mapa hipsométrico (Figura 2) e do mapa de solos (Figura 3), constata-se que existe neste terço da bacia uma estreita relação entre áreas mais altas (500 a 700m), solos Litólicos e vegetação mais densa. Esta relação se dá também, em outras áreas da bacia e em serras interiores, em situações de terrenos mais declivosos, onde são comuns a presença de afloramentos de rochas. As sub-classes de vegetação densa, relacionadas com as classes Arbórea subarbórea, Subarbórea arbustiva e Arbustiva subarbórea, ocupam 1.042,5 km², 369,4 km² e 582,1

km² da bacia, respectivamente. Estas correspondem no conjunto, a 35% da área da bacia (Tabela 3). Trabalhando em sub-bacias da bacia do Taperoá, Paes-Silva et al. (2003) e Guimarães (2009) também observaram esta relação entre vegetação e áreas declivosas e de difícil acesso, normalmente distantes das linhas de drenagem (Figura 9).

Tabela 3. Áreas de ocupação em km² e porcentagem das classes de vegetação de Caatinga e cobertura de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Taperoá.

Classes de vegetação e uso da terra	Áreas	
	(km ²)	(%)
Arbórea Subarbórea densa	1.042,5	18,3
Subarbórea Arbustiva densa	369,4	6,5
Arbustiva Subarbórea densa	582,1	10,2
Arbustiva Subarbórea aberta	666,5	11,7
Arbustiva Subarbustiva aberta	1.101,1	19,4
Subarbustiva Arbustiva rala	1.368,6	24,1
Subarbustiva Arbustiva muito rala	251,8	4,4
Solo exposto	55,4	1,0
Corpo d'água	32,1	0,6
Nuvem	216,9	3,8
Área Total	5.686,4	100,00

Por outro lado, pode se observar que as áreas que apresentam vegetação de menor porte e densidade de recobrimento, rala (1.368,6 km²) e muito rala (251,8 km²), estão normalmente associadas às áreas de ocorrência do solo Luvisolo Crômico, que se localizam, predominantemente, na parte mais baixa da paisagem (< 400 m) e próximas a rede da drenagem (Figura 9). Deve-se considerar que nestas classes de vegetação estão incluídas as áreas agrícolas e de pastagens, não mapeadas neste trabalho. Os Luvisolos foram os solos tradicionalmente utilizados pelo binômio algodão e gado, além de que, pela proximidade da água e dos solos férteis de várzea, essas são áreas mais densamente povoadas, que sofrem mais fortes pressões das atividades humanas.

Em situação intermediária, as classes de vegetação aberta, Arbustiva subarbórea (666,5 km²) e Arbustiva subarbustiva (1.101,1 km²), se distribuem de forma difusa na bacia, ocupando um percentual de 31,1% da sua área. Essas são áreas de dupla função, pois além da oferta de madeira, são utilizadas como área de pastagem.

Estimativa da Biomassa da Vegetação Lenhosa

Para a estimativa da biomassa da vegetação de caatinga da bacia do Taperoá adotou-se como referência o IBVL = 1, que corresponde a estimativa apresentada por Francelino et al. (2003), de $108\text{m}^3\text{ ha}^{-1}$ de madeira (Tabela 4). Este dado foi obtido de uma área de caatinga preservada, descrita como Caatinga fechada do tipo florestal 4, com alto valor de recobrimento do solo e com presença de sub-bosques. Utilizando-se das áreas das classes de vegetação mapeadas e dos seus respectivos valores médios do IBVL, obteve-se o rendimento médio por hectare de biomassa de cada classe de vegetação. Observa-se na Tabela 4, que o rendimento médio de madeira por hectare variou de $8,1\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ para a classe Subarbustiva arbustiva muito rala a $70,2\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ para a classe Arbórea subarbórea densa.

Tabela 4. Dados de referência para estimativa do volume da biomassa lenhosa.

Classes	Volume Referência ($\text{m}^3\text{ ha}^{-1}$)	IBVL médio	Rendimento ($\text{m}^3\text{ ha}^{-1}$)	Área (ha) $\times 10^2$	Volume de Biomassa ($\text{m}^3\text{ 10}^3$)
Arbórea Subarbórea densa	108	0,65	70,2	1.042,5	7.318,4
Subarbórea Arbustiva densa	108	0,55	59,4	369,4	2.194,2
Arbustiva Subarbórea densa	108	0,45	48,6	582,1	2.829,0
Arbustiva Subarbórea aberta	108	0,35	37,8	666,5	2.519,4
Arbustiva Subarbustiva aberta	108	0,25	27,0	1.101,1	2.973,0
Subarbustiva Arbustiva rala	108	0,15	16,2	1.368,6	2.217,1
Subarbustiva Arbustiva muito rala	108	0,075	8,1	251,8	204,0
Solo exposto	-	-	0	55,4	0
Corpo d'água	-	-	-	32,1	-
Nuvem	-	-	-	216,9	-
Total	-	-	-	5.686,4	20.255,1

Para cada classe de vegetação o volume total de biomassa lenhosa é estimado pelo produto entre o rendimento médio e a área ocupada por cada classe de vegetação na bacia hidrográfica. Observou-se que os valores de biomassa lenhosa totais, variaram entre classes de vegetação de $204.000\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$, para a classe Subarbustiva arbustiva muito rala, a $7.318.400\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$, para a classe Arbórea subarbórea densa, totalizando um volume estimado para a bacia de $20.255.100\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ (Tabela 4). Considerando que 1 m^3 de madeira é igual a 3,4 estéreis (metro cúbico de lenha empilhada), teríamos assim um estoque de lenha na bacia de 68.867.340 estéreis. Costa et al. (2002), para a região do Seridó, no Rio Grande do Norte, encontraram para melhor condição de preservação da vegetação, um valor de apenas, $48\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$.

Estimativa da Degradação da Vegetação Lenhosa

A estimativa da degradação da vegetação da Caatinga pode ser considerada como um parâmetro quantitativo importante para medir o grau de intervenção humana e o estado de conservação de uma bacia hidrográfica. Embora assumas as limitações impostas à obtenção dos dados deste trabalho, quais sejam o grau de imprecisão das estimativas das classes de vegetação e a impossibilidade de discriminação dos diferentes tipos de uso da terra, pode-se considerar que a metodologia utilizada neste trabalho apresenta resultados satisfatórios.

Para a estimativa da degradação da vegetação, os dados utilizados são os mesmos para a estimativa do volume de biomassa (Tabela 5). Parte-se da condição hipotética de que toda a área da bacia, descontadas as áreas relativas a corpos d'água e cobertura de nuvem, estaria numa condição de máxima preservação (IBVL = 1). Neste caso, calculadas as frações de degradação de cada classe de vegetação em relação à condição de máxima preservação (1 - IBVL), coluna 3 da Tabela 5, estima-se pelo produto das áreas ocupadas por cada classe de vegetação, os totais de biomassa degradada de cada classe de vegetação, e pela soma dos totais das classes, a biomassa degradada total da bacia hidrográfica, que foi de 38.488.900 m³.

Tabela 5. Dados e estimativa da degradação da vegetação da bacia do rio Taperoá.

Classes	Volume Referência (m ³ ha ⁻¹)	Fração de Degradação (1-IBVL)	Volume Degrado (m ³ ha ⁻¹)	Área (ha) x 10 ²	Volume Biomassa (m ³ 10 ³)
Arbórea Subarbórea densa	108	0,35	37,8	1.042,5	3.940,7
Subarbórea Arbustiva densa	108	0,45	48,6	369,4	1.795,3
Arbustiva Subarbórea densa	108	0,55	59,4	582,1	3.477,7
Arbustiva Subarbórea aberta	108	0,65	70,2	666,5	4.678,8
Arbustiva Subarbustiva aberta	108	0,75	81,0	1.101,1	8.918,9
Subarbustiva Arbustiva rala	108	0,85	91,8	1.368,6	12.563,7
Subarbustiva Arbustiva muito rala	108	0,925	99,9	251,8	2.515,5
Solo exposto	108	1,00	108,0	55,4	598,3
Corpo d'água	-	0,00	-	0,0	-
Nuvem	-	0,00	-	0,0	-
Área útil e volume de degradação	-	-	-	5.437,4	38.488,9
Máximo de biomassa	108	-	-	-	58.723,9
Índice de Degradação	-	-	-	-	65,5%

Estabelecendo-se a razão comparativa entre o volume total de biomassa degradada em relação ao volume hipotético total de biomassa da bacia, expresso em

porcentagem, obtém-se o índice de degradação de biomassa da vegetação lenhosa que é de 65,5%.

Em cálculo feito utilizando os dados do diagnóstico da vegetação da bacia hidrográfica do açude de Soledade, realizado por Guimarães (2009) utilizando a mesma metodologia deste trabalho, foi obtido um índice de degradação de 72%. A bacia de Soledade é uma sub-bacia desta área de estudo, portanto, um valor comparável ao encontrado neste trabalho, o que vem a confirmar o alto grau de degradação das terras da região do Cariri Paraibano.

MODELAGEM E MAPEAMENTO DA DEGRADAÇÃO DA CAATINGA

A degradação ambiental é quase sempre o resultado da pressão excessiva do uso das terras ao longo do tempo e do espaço, acelerando o processo erosivo dos solos. A desertificação definida como a degradação das terras áridas, semiáridas e subúmidas, se constitui um grave problema mundial, com consequências ambientais, sociais e econômicas preocupantes.

Como uma contribuição para a avaliação da degradação das terras da caatinga, foi proposta a utilização de um modelo, que é uma simplificação da Equação Universal de Perdas de Solos (Wischmeier e Smith, 1978). O modelo estima o grau de degradação das terras a partir do índice de degradação das terras da Caatinga (IDTC), que é função inversa do índice de cobertura da vegetação (IV) e direta da declividade do terreno (ID) e do índice da erodibilidade do solo (IE). Podendo ser assim representado:

$$IDTC = IV * ID * IE \quad (Eq. 1)$$

Em comparação com a análise que poderia ser feita pelo modelo da Equação Universal de Perdas de Solo (Wischmeier e Smith, 1978), não se considerou o fator erosividade da chuva, uma vez que a área de estudo é relativamente homogênea do ponto de vista climático; nem o fator prática conservacionista, uma vez que considera-se como uso da terra, apenas a vegetação natural da caatinga. Outro fator não levado em conta nesta modelagem é o fator tempo. Como se sabe, para as mesmas condições de uso e manejo da terra, o grau de degradação varia com o tempo.

Geração do Índice de Vegetação

Para a parametrização dos índices de vegetação adotou-se a segmentação de cinco classes de risco a degradação (Tabela 6), baseadas nos valores limites possíveis do Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL). Utilizando a equação de correlação, a partir dos valores limites de IBVL, foram calculados os valores limites das classes correspondentes de NDVI. Após a obtenção desses valores foi gerado o mapa de risco a degradação devido ao grau de cobertura da vegetação no programa LEGAL do SPRING (Figura 10a). Cada classe de risco recebeu um índice numérico correspondente ao grau de intensidade de risco da classe no processo erosivo (Tabela 6).

Tabela 6. Classes e índices da vegetação relativos aos riscos de degradação das terras.

Classes de risco	Vegetação (IBVL)	Índice da Classe
Muito Baixa	0,8-1,0	1
Baixa	0,6-0,8	3
Média	0,4-0,6	5
Alta	0,2-0,4	7
Muito Alta	0-0,2	9

Geração do índice da declividade (ID)

Para a geração do índice de declividade foi utilizado um mosaico digital do SRTM dos quadrantes SB24ZB, SB24ZD da área de estudo utilizando o programa Global Mapper e a partir deles foram geradas as curvas de nível com equidistância de 10 metros. Para gerar a grade triangular foi utilizado o programa SPRING e as curvas de nível como base de dados. Em seguida foi realizado o fatiamento da grade triangular, baseado nos limites das classes de declividade, procedendo-se o mapeamento de cinco classes de declividade de acordo com a Tabela 7, e sua representação pela Figura 10b.

Tabela 7. Classes e índices de declividade relativos aos riscos de degradação das terras.

Classes de Declividade	Limites de Classe (%)	Classes de risco	Índice da Classe
Plano	0-3	Muito Baixo	1
Suave Ondulado	3-6	Baixo	3
Moderado Ondulado	6-12	Médio	5
Ondulado	12-20	Alto	7
Forte Ond./Montanhoso	>20	Muito Alto	9

Fonte: Adaptado de Francisco (2010).

Esta metodologia utiliza o modelo proposto por Denardin (1990), modificado, adaptando os dados de textura do boletim de solos para obtenção do parâmetro granulométrico (M) e convertendo as descrições da drenagem dos perfis dos solos em classes de permeabilidade (P), para aplicação na fórmula de determinação proposta por Denardin (1990):

$$K = 0,00000797 (M) + 0,0029283 (P) \quad (r^2 = 0,9561) \quad (\text{Eq. 2})$$

Para ordenação dos dados dos solos e estimativa da erodibilidade foi utilizada a planilha Excel Microsoft. Para cada unidade de mapeamento foram utilizados apenas os dados do horizonte superficial da classe representativa das associações dos solos de cada unidade de mapeamento. Os valores da erodibilidade foram agrupados em cinco classes de risco, de acordo com os dados da Tabela 8, e sua representação pela Figura 10c.

Tabela 8. Classes e índices de erodibilidade relativos aos riscos de degradação das terras.

Classes de risco	Erodibilidade (Mg mm MJ ⁻¹ ha ⁻¹)	Índice da Classe
Muito Baixa	<0,01	1
Baixa	0,01-0,02	3
Média	0,02-0,03	5
Alta	0,03-0,04	7
Muito Alta	>0,04	9

Estimativa e mapeamento da degradação da caatinga

O Índice de degradação das terras da caatinga (IDTC) é estimado pela Equação 1, a partir do produto entre os subíndices dos parâmetros vegetação, declividade e solo. Como se pode observar na Tabela 9, adotou-se um escalonamento dos valores dos subíndices (1 a 9), procurando-se representar esquematicamente o efeito exponencial da aceleração do processo erosivo. A definição dos limites das classes de Degradação foi feita por aproximação das condições de risco de erosão, oferecidas pela conjunção do grau de riscos dos três parâmetros do modelo, baseado nos critérios de limitação da Classificação de Capacidade de Uso das Terras (Lepsch et al., 1991).

Tabela 9. Parâmetros para estimativa das classes de degradação das terras.

Classes de Risco	Cobertura Vegetal (IBVL)	Índice Classe	Declividade (%)	Índice Classe	Erodibilidade (Mg mmMJ ⁻¹ ha ⁻¹)	Índice Classe	Limites Classes Degradação
Muito Baixa	80-100	1	0-3	1	<0,01	1	0-3
Baixa	60-80	3	3-6	3	0,01-0,02	3	3-15
Média	40-60	5	6-12	5	0,02-0,03	5	15-45
Alta	20-40	7	12-20	7	0,03-0,04	7	45-175
Muito Alta	0-20	9	>20	9	>0,04	9	>175

Utilizando-se a linguagem algébrica (LEGAL) do SPRING foi montada a equação para estimativa do IDTC (Equação 1), procedendo-se o cruzamento dos subíndices temáticos para geração automática do mapa de degradação das terras da bacia do Taperoá (Figura 10d). Os valores do IDTC podem variar de 1, para uma condição de risco mínimo a degradação, a 729, para uma condição em que a vulnerabilidade a degradação é máxima para todos os parâmetros do modelo.

A Figura 5d representa a espacialização dos prováveis níveis de degradação em que se encontram as terras da bacia hidrográfica do rio Taperoá. Embora se reconheçam as limitações relativas aos métodos e procedimentos da determinação e obtenção dos dados, a exemplo da dificuldade na discriminação dos diferentes tipos de uso e cobertura vegetal, a representatividade das amostras e precisão das determinações da erodibilidade dos solos, e em menor grau, a precisão da determinação da declividade,

pode-se afirmar que os resultados obtidos são satisfatórios para prognosticar a degradação das terras da bacia do Taperoá.

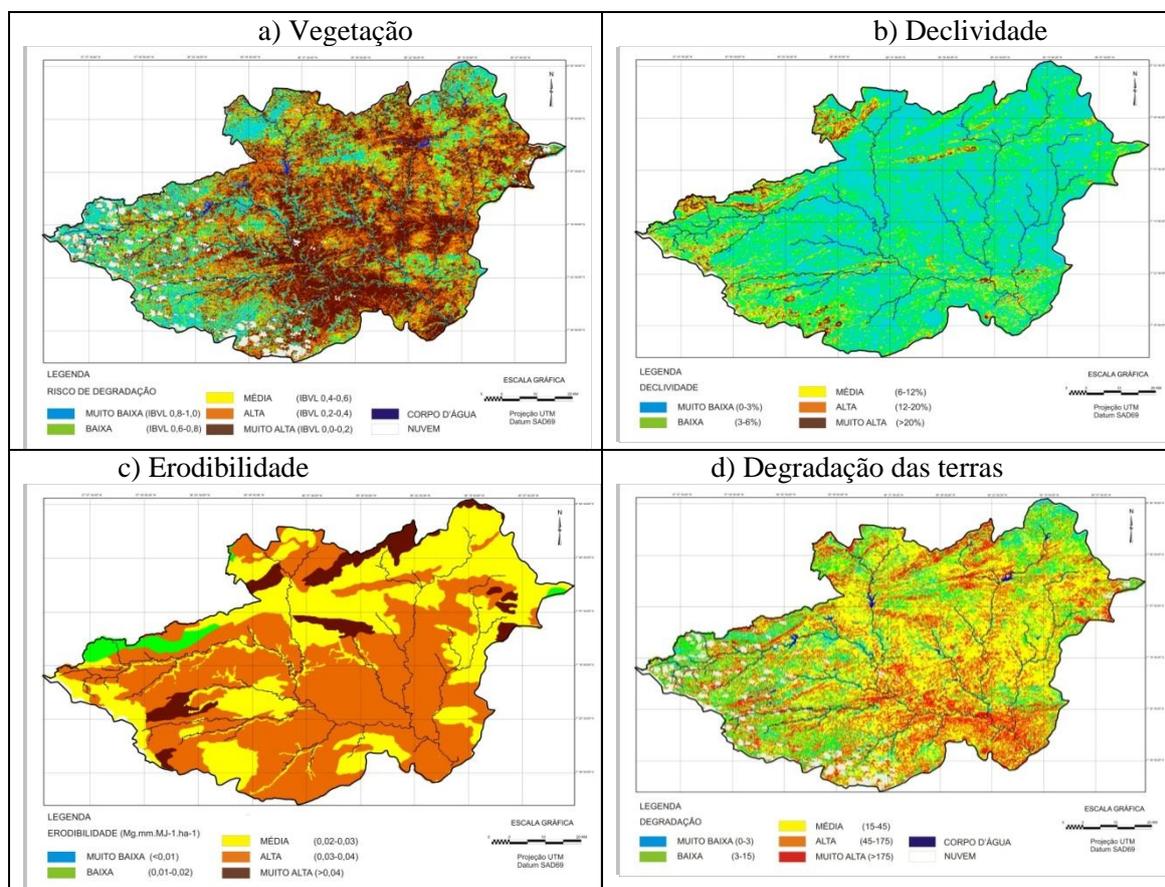


Figura 10. Mapas de classes de riscos relativos à degradação das terras da bacia hidrográfica do rio Taperoá.

Baseado nos dados da Tabela 10 pode-se afirmar que 11,9% das terras da bacia do rio Taperoá apresentam grau muito alto e 15% grau alto de degradação. Observando-se a Figura 10d pode-se constatar uma grande área de ocorrência destas classes de degradação, no terço inferior da área, abrangendo os municípios de Cabaceiras, São João do Cariri e Parari, ao longo do rio Taperoá. Consultando os mapas temáticos de solos e vegetação observa-se que essas classes de degradação estão associadas às áreas de ocorrência dos Luvisolos Crômicos vérticos, com erodibilidade alta (Figura 10c) e a classe muito alta de risco a erosão devido a vegetação arbustiva e subarbustiva rala, ali predominantes (Figura 10a).

Pode-se constatar uma imprecisão deste prognóstico de degradação, que corresponde às áreas de ocorrência do solo Neossolo Regolítico, classificado como de

erodibilidade muito alta (Figura 10c). Essas são áreas agrícolas, portanto, com baixo índice de proteção do solo (alto risco a degradação), Figura 10a, o que resultou num prognóstico de degradação alta (Figura 10d). Contudo são áreas planas (Figura 10b) onde não se constata problemas sérios de degradação. Por outro lado, a área de Cambissolo classificado como de erodibilidade muito baixa (Figura 10c), na linha do divisor a noroeste, guarda uma classificação coerente: degradação baixa, uma vez que, apesar de ser área declivosa, está bem protegida pela vegetação.

Tabela 10. Áreas de abrangência de classes de risco a degradação e de degradação das terras da bacia do rio Taperoá.

Classes de risco	Erodibilidade		Declividade		Cobertura Vegetal		Degradação	
	(km ²)	(%)						
Muito baixa	0	0	3.370	59,3	1.045	18,4	539	9,5
Baixa	130	2,3	1.576	27,7	369	6,5	738	13,0
Média	2.174	38,2	502	8,8	667	11,7	2.635	46,2
Alta	3.056	53,8	154	2,7	1.682	29,6	851	15,0
Muito alta	326	5,7	85	1,5	1.675	29,6	675	11,9
Corpo d'água	-	-	-	-	32	0,6	32	0,6
Nuvens	-	-	-	-	216	3,8	216	3,8
Total	5.686	100	5.686	100	5.686	100	5.686	100

Apesar da predominância dos solos Neossolos Litólicos no terço oeste da bacia, classificados como de erodibilidade alta (Figura 10c), observa-se nessa área, um grande percentual de áreas com degradação baixa e muito baixa (Figura 10d), isto devido a maior cobertura vegetal e ao relevo mais plano, como se pode observar nos mapas temáticos (Figuras 10a e b).

Em termos de área de abrangência, Tabela 10, os fatores que mais contribuem para a degradação das terras na bacia do Taperoá são a erodibilidade alta dos solos (53,8%) e a baixa cobertura da vegetação nas classes de risco alta (29,6 %) e muito alta (29,69%). Por outro lado, a declividade, com classes de risco muito baixo e baixo, contribui para amenizar os riscos de degradação em 87% da área da bacia hidrográfica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diversidade e as nuances do conjunto dos elementos que formam a paisagem da Caatinga, além da dinâmica dos componentes atmosféricos do clima tropical, tornam a análise e a interpretação dos registros das imagens, um trabalho bastante complexo.

As leituras dos Índices de Vegetação para as plantas fotossinteticamente ativas da Caatinga (período úmido) apresentam baixa correlação com a biomassa (IBVL), e na média, praticamente dobram de valores, em comparação com as leituras do período seco. Neste caso, análises temporais de mudanças da cobertura da terra de ambientes semiáridos devem ter um rigoroso controle da condição de umidade. Numa análise preliminar da vegetação de Caatinga da bacia do Taperoá, em uma sequência plurianual de imagens Landsat do período seco, foram observadas variações inconsistentes do padrão da cobertura da vegetação verificados nos valores de NDVI. Esse fato provavelmente ocorreu devido a diversidade das condições de umidade do solo e atmosférica, de ano para ano.

A reflectância do solo é outro fator que pode induzir a erros de leituras da vegetação. Os dados de NDVI para vegetação de Caatinga rala e aberta em área de solos claros (Planossolo e Regossolo) foram mais altos e dispersos do que as dos solos mais escuros (Luvisolo Crômico e Neossolo Litólico) da bacia. Neste caso, para minimizar o erro de estimativa da biomassa da vegetação recomenda-se fazer uma curva de calibração do índice espectral com a vegetação, para cada unidade ambiental.

Embora os resultados obtidos tenham mostrado um sucesso relativo na avaliação quantitativa da biomassa lenhosa da Caatinga, a discriminação qualitativa de diferentes tipos de uso e de padrões de vegetação ainda precisa ser resolvida, para permitir automatizar a análise e o monitoramento das terras do Semiárido.

Apesar da utilização de modelos preditivos para estimativa da degradação da Caatinga, utilizando-se de parâmetros mais diretamente relacionados ao fenômeno da erosão hídrica, seus resultados ainda precisam ser melhor avaliados. A erodibilidade do solo é um parâmetro que necessita ser mais estudado para as condições dos solos da região do Semiárido, para que possa dar uma contribuição efetiva na avaliação da vulnerabilidade à degradação das terras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através do Projeto de Pesquisa nº 35/20109 INSA/CT-HIDRO-CNPq e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, ao doutorando Paulo Roberto

Megna Francisco, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, J. J. A.; Araújo, M. A. de; Nascimento, S. S. do. Degradação da caatinga: uma investigação ecogeográfica. *Revista Caatinga*, v.22, n.3, p.126-135, 2009.

Allen, R.; Bastiaanssen, W.; Waters, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. Surface energy balance algorithms for land (SEBAL). Idaho implementation – Advanced Training and User’s Manual, 97p. 2002.

Bispo P. C.; Valeriano, M. M.; Duplich, T. M. Relação da vegetação de caatinga com a condição geomorfométrica local. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.14, n.5, p.523-530, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro. Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL, 1972 (Boletins DPFS-EPE-MA, 15 - Pedologia, 8).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN-Brasil. Brasília-DF, 2005, 213p.

Carvalho, V. C. de; Freitas, M. W. D. de. Mapeamento das paisagens em nível de geossistema de três áreas representativas do bioma Caatinga. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12, 2005, Goiânia. Anais.... Goiânia: INPE, p.2087-2099, 2005.

Chaves, I. B.; Slack, D. C.; Guertin, D. P.; Lopes, V. L. Estimativa da erodibilidade e sua relação com outros atributos dos solos do Estado da Paraíba. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*, 15, 2004, Santa Maria. Anais... Santa Maria, 2004.

Chaves, I. de B.; Lopes, V. L.; Ffolliott, P. F.; Paes-Silva, A. P. Uma classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da caatinga. *Revista Caatinga*, v.21, n.2, p.204-213, 2008.

Chaves, I. de B.; Guimarães, A. P.; Lima, E. R. V. de; Francisco, P. R. M. Índices espectrais e diagnóstico da degradação da caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, Paraíba-BR. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e Água*, 19, 2012, Lajes. Anais... Lajes: SBCS, 2012. CD Rom.

Chaves, I. B.; Francisco, P. R. M.; Chaves, H. G. C.; Lima, E. R. V.; Silva, B. B. Umidade antecedente e índice de vegetação da diferença normalizada no mapeamento da caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física* (no prelo), 19p.

Coppin, P.; Jonckheere, I. ; Nackaerts, K.; Muys, B.; Lambin, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, v.25, n.9, p.1565-1596, 2004.

Costa, T. C. C.; Accioly, L. J. O.; Oliveira, M. A. J.; Burgos, N.; Silva, F.H. B. B. Phytomass mapping of the “Seridó Caatinga” vegetation by the plant area and the Normalized Difference Vegetation Indices. *Scientia Agricola*, v. 59, n.4. p. 707-715, out/dez, 2002.

Denardin, J. E. Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo, 1990.

Desertwatch. DesertWatch Extention project. European Space Agency. Disponível em: <http://www.desertwatch.info/>. Acesso em 12/12/2012.

Feitosa, J. R. P.; Costa Filho, J. F. da; Silva, B. B. da. Avaliação de índices de vegetação em área irrigada do sub-médio São Francisco, Petrolina-PE, a partir de imagens do satélite LANDSAT 5–TM. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 18, 2004, Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2004.

Francelino, M. R.; Fernandes Filho, E. I.; Resende, M.; Leite, H. G. Contribuição da Caatinga na sustentabilidade de projetos de assentamentos no Sertão Norte-Rio-Grandense. *Revista Árvore*, v.27, n.1, 2003. p.79-86.

Francisco, P. R. M. Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas. 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.

Francisco, P. R. M. Modelo de mapeamento da deterioração do Bioma Caatinga da bacia hidrográfica do Rio Taperoá, PB. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

Francisco, P. R. M.; Chaves, I. B.; Lima, E. R. V.; Bandeira, M. M.; Silva, B. B. Mapeamento da caatinga com uso de geotecnologia e análise da umidade antecedente em bacia hidrográfica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.5, n.3, 2012. p.676-693.

Guimarães, A. P. Dinâmica da resposta espectral da vegetação de caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2009.

Kazmierczak, M. L. Índice de vegetação derivado do NOAA/AVHRR: análise da sazonalidade da cobertura vegetal em região de clima semiárido (caatinga). Fortaleza: FUNCEME, 1993. 106p.

Lepsch, I. F.; Bellinazzi, J. R.; Bertolini, D.; Espíndola, C. R. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175p.

Lopes, H. L.; Accioly, L. J. O; Candeias, A. L. B.; Sobral, M. C. Análise de índices de vegetação na bacia do rio Brígida, sertão do estado de Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 3, 2010, Recife. Anais... Recife, 2010. p.01-08.

Maldonado, F. D. Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semiárido. 311p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). São José dos Campos: INPE, 2005.

Maldonado, F. D. Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semiárido brasileiro: Quixaba – PE, Brasil. (INPE-7180-TD/680). 116p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: INPE, 1999.

Meneses, P. R.; Netto, J. S. M. Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília. UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

Moreira, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 3. ed. Viçosa: UFV, 2005. 320p.

Moreira, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação. 2. ed. São José dos Campos, Viçosa: UFV, 2004. 307p.

Morais, Y. C. B.; Santos, B. O.; Laurentino, M. L. S.; Silva, J. C. B.; Galvêncio, J. D. Análise espaço-temporal e detecção de mudanças da cobertura vegetal no município de Floresta, PE – Brasil, utilizando o NDVI. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, 2011, INPE p. 2128.

Oliveira, W. M. de; Chaves, I. de B.; Lima, E. R. V. de. Índices espectrais de vegetação de caatinga em um neossolo litólico do semiárido paraibano. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal. Anais... Natal: INPE, 2009. p.2103-2110.

PARAÍBA. Governo do Estado - Secretaria de Agricultura e Abastecimento – CEPA – PB. Zoneamento Agropecuário do Estado da Paraíba. Relatório ZAP-B-D-2146/1. UFPB-EletroConsult Ltda. Dez, 1978. 448p.

Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação. 1.ed. S. J. dos Campos: Parêntese. v.1, 2007. 135 p.

Paes-Silva, A. P.; Chaves, I. B.; Sampaio, E. V. S. B. Cobertura vegetal da bacia hidrográfica do Açude Namorado no cariri oriental paraibano. Agropecuária Técnica. v. 24, n.1, p.47-59, 2003.

Paixão, F. E.; Vale, R. de M. C. do; Lobão, J. S. B. Mapeamento de áreas susceptíveis à desertificação no nordeste da Bahia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2009, Natal. Anais... Natal: INPE, 2009. p.4195-4200.

Rosendo, J. S. Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na bacia do rio Araguari – MG utilizando dados do sensor MODIS. 152p. Dissertação

(Mestrado em Geografia e Gestão do Território). Universidade de Uberlândia, MG, Uberlândia, 2005.

Sampaio, E. V. S. B.; Rodal, M. J. N. Fitofisionomias da Caatinga. In: J. M. C. Silva; Tabarelli, M. (coord.). Workshop Avaliação e identificação de ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade do bioma Caatinga. Petrolina, Pernambuco. 2000. Disponível em www.biodiversitas.org.br/caatinga.

Schucknecht, A.; Erasmi, S.; Niemeyer, I.; Matschullat, J. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. *European Journal of Remote Sensing*. v. 46, p. 40-59. 2013

Silva, B. B.; Lopes, G. M.; Azevedo, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens LANDSAT 5-TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.13, n.2, p.11-21, 2005.

Silva, B. B.; Mendonça, R. R. O.; Araújo, S. T.; Bezerra, B. G. Obtenção do albedo e IVDN em áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM - Landsat 5 e algoritmo SEBAL/METRIC. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal, Anais...Natal, INPE, p.475-482. 2009.

Tood.S.W.; Hoffer, R. M.; Milchunas, D.G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *Int. j. remote sensing*, 1998, vol. 19, no. 3, 427-438

UNITED NATIONS. Text of the United Nations Convention to Combat Desertification. 2001. Disponível em <www.unccd.int/convention/text/convention.php>. Acesso em 12 março de 2012.

Viganó, H. A.; Borges, E. F.; Franca-Rocha, W. J S. Análise do desempenho dos índices de vegetação NDVI e SAVI a partir de imagem Aster. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. Anais...Curitiba, INPE, p.1828-1834, 2011.

Wischmeier, W. H.; Johnson, C. B.; Cross, B. W. A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, v.26, n.5, p.189-193,1971.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. USDA, Washington. 58p. 1978. (Agriculture Handbook 537).