



# ÍNDICE DE VULNERABILIDADE À EROSÃO PARA UMA BACIA NA MESORREGIÃO DO SÃO FRANCISCO PERNAMBUCANO, A PARTIR DAS RELAÇÕES ENTRE MORFOGÊNESE E PEDOGÊNESE

**Jéssica Bezerra de Menezes**

*Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Ciências Geográficas. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife, PE  
jessica.menezesgeo@gmail.com*

**Maria do Socorro Bezerra de Araújo**

*Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Ciências Geográficas. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife, PE  
socorroaraujo@pq.cnpq.br*

**Josiclêda Domiciano Galvêncio**

*Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Ciências Geográficas. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife, PE  
josicleda@hotmail.com*

**Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio**

*Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear. Av. Prof. Luís Freire, 1000, 50740-540, Recife, PE  
everardo.sampaio@pq.cnpq.br*

**Antonio Carlos de Barros Corrêa**

*Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Ciências Geográficas. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife, PE  
antonio.correa@pq.cnpq.br*

---

## Resumo

No contexto semi-árido do Nordeste do Brasil os processos superficiais são comandados pela magnitude dos inputs pluviais, sua recorrência espaço-temporal e interação direta com as formações superficiais peculiares a este domínio e as práticas de uso da terra. De fato, na escala das micro-bacias a erosão hídrica representa a forma mais importante de ocorrência e constitui um problema ambiental nos espaços agrários tradicionais do semi-árido nordestino. Na bacia do riacho Mulungu, o panorama social da comunidade denota o baixo nível de desenvolvimento humano, enquanto o panorama ambiental reflete a pressão que esta exerce sobre o seu suporte natural, sendo observada erosão linear em sulcos e ravinas, formação de leques de dejeção assoreando o leito do rio, crostas salinas na superfície do solo e baixa densidade da cobertura vegetal nativa. O objetivo deste trabalho foi determinar um índice de vulnerabilidade à erosão para a bacia do riacho Mulungu, utilizando os princípios da Ecodinâmica de Tricart e técnicas de sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto. A fim de se obter uma imagem sucinta da estruturação superficial da paisagem e sua dinâmica, foram superpostos em ambiente digital os mapas pedológico, geomorfológico, geológico, de vegetação, do modelo digital de elevação e de declividade da área. Em seguida, foram estimados índices de vulnerabilidade considerando a interação entre a geologia, a geomorfologia, os tipos de solo, a vegetação, a distribuição da precipitação e o uso do solo. A partir da análise desses parâmetros, foi estimado um índice geral de vulnerabilidade morfodinâmica para a bacia que correspondeu a 2,0, indicando que a área da bacia possui um grau de susceptibilidade intermediário.

**Palavras-chave:** processos superficiais, cobertura vegetal, classes de solo, sistema de informação geográfica, sensoriamento remoto.

## Abstract

In the semi-arid context of Northeastern Brazil superficial processes are ruled by the magnitude of pluvial inputs, their recurrence in time and space, and direct interaction with superficial formations peculiar to this morphogenetic domain as well as land use practices. In fact, at a micro-watershed scale pluvial erosion is the most representative type, and constitutes an environmental problem within the traditional agrarian spaces of the semi-arid Northeast. In the watershed of Mulungu creek, the social context displays the low human development level of its population, whereas the environmental context reflects the stress exerted by the former upon its physical support, in the shape of increased linear erosion, alluvial fan formation and channel siltation, outcropping of saline crusts and the low density of the native vegetation cover. The aim of this work was to determine an erosion vulnerability index for Mulungu creek watershed using the principles of Tricart's Ecodynamics as well as geographical information system and remote sensing techniques. In order to obtain an expedite image of landscape superficial structure and its dynamics, a climatic graph was created, and latter digital thematic maps of soils, landforms, geology, vegetation, slope gradient and a digital terrain model were overlaid. Following, vulnerability indexes were estimated based on the interaction amongst geological, geomorphological, pedological, vegetation, climate and land use data. From the analysis of those parameters a general morphodynamics index was obtained for the watershed, rendering a value of 2.0, which indicates that the study area is susceptible to morphogenesis, in fact quite close to a strong ecodynamic instability level.

**Keywords:** surface processes; vegetable cover; soil classes; geographical information system; remote sensing

## 1. Introdução

Nas condições tropicais semi-áridas, a erosão hídrica é a forma mais importante de ocorrência e depende fundamentalmente da intensidade da chuva, da infiltração da água, da topografia, do tipo de solo e da densidade da cobertura vegetal existente (Wischmeier & Smith, 1978). A erosão decorrente do escoamento superficial é uma das formas mais generalizadas de degradação do solo e é agravada em virtude da sua irreversibilidade, pois a formação do solo é resultado de um processo muito lento, e porque é na camada superficial onde são acumulados mais nutrientes e matéria orgânica (Sampaio et al., 2003).

No semi-árido brasileiro a combinação de chuvas fortes, derivadas de sistemas convectivos, concentradas na época do plantio, sob cobertura vegetal decídua sujeita à perda quase que total da cobertura foliar durante a longa estação seca anterior, resulta em águas de riachos e rios carregadas de sedimentos, assoreamento rápido de reservatórios de água, acúmulo de sedimentos nas baixadas e, como evidência inquestionável, os sulcos e voçorocas amplamente disseminados, indicando que taxas elevadas de erosão e produção local de sedimento constituem um problema ambiental na região (Sampaio et al., 2003). No entanto, trabalhos como o de Walling & Webb (1996) indicam que a alta susceptibilidade à erosão pluvial é função do tipo de cobertura vegetal e peculiaridade climática dos ambientes semi-áridos quentes, com valores máximos de erosão nas bacias ocorrendo no intervalo de precipitação anual média entre 300 e 500 mm, como é o caso dos tributários da margem

esquerda do sub-médio São Francisco, no Estado de Pernambuco. Valores de perda de solo por erosão pluvial atingindo 100 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> são citados para o Nordeste semi-árido (Sampaio & Salcedo 1997). Especificamente, para o setor semi-árido da bacia do São Francisco há relatos de 72 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Leprun & Silva 1995).

A bacia do riacho Mulungu, no município de Belém de São Francisco, abriga uma comunidade de cerca de cem famílias que habitam ao longo do canal do riacho, com base econômica assentada na caprinocultura extensiva. O panorama social e ambiental da comunidade denota o baixo nível de desenvolvimento humano e a pressão que esta exerce sobre o seu suporte natural. Ao longo do riacho, foram observadas erosão linear em sulcos e ravinas, formação de leques de dejeção assoreando o leito do rio, afloramento de crostas salinas na superfície do solo e baixa densidade da cobertura vegetal nativa.

A desestabilização erosiva das formações superficiais na bacia do Mulungu, incrementada pela antropização, associada à ocorrência de solos rasos e com salinidade, provavelmente é uma das principais causas da baixa produtividade agrícola na área. Para um melhor planejamento das intervenções, com o intuito de recomendar manejos adequados aos tipos de solo ocorrentes no domínio semi-árido e mitigar os efeitos negativos dos diversos tipos de erosão observados, faz-se necessário realizar um levantamento das características físicas da bacia e uma avaliação da sua susceptibilidade aos fenômenos erosivos.

A fim de aferir de forma sistêmica à vulnerabilidade à erosão no contexto de uma bacia de drenagem faz-se

necessário uma integração dos dados físicos da unidade de paisagem, que pode ser feita a partir dos princípios da Ecodinâmica (Tricart, 1977). Estes princípios estabelecem uma gradação entre a morfogênese, na qual prevalecem os processos erosivos modificadores das formas de relevo, e a pedogênese, onde se sobressaem os processos formadores de solos.

O conjunto de atributos físicos necessários à análise de uma unidade de paisagem está relacionado à gênese, forma e estágio de evolução do relevo e suas formações superficiais, condições climáticas, bem como à natureza da cobertura vegetal que sobre elas se desenvolve. Esses atributos necessitam ser integrados para que se tenha um retrato o mais fiel possível do comportamento de cada unidade frente à sua ocupação e estágio de morfogênese (Crepani et al. 1996).

O resultado dessa integração caracterizará a forma de relevo da unidade de paisagem e permitirá que se quantifique empiricamente a energia potencial disponível para o escoamento e transporte de sedimentos (Morisawa, 1968). Desta maneira, pode-se entender que, em linhas gerais, unidades de paisagem que apresentam valores altos de amplitude de relevo, declividade e grau de dissecação, prevalecem os processos morfogenéticos da Ecodinâmica, enquanto que em situações de baixos valores para as características morfométricas prevalecem os processos pedogenéticos (Crepani et al., 1996). Desta forma, o objetivo deste trabalho é determinar um índice de vulnerabilidade à erosão para a bacia do riacho Mulungu, utilizando os princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977) mediados pelo uso de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Este índice servirá de base para a identificação mais acurada de áreas suscetíveis aos impactos da erosão e para recomendação de usos mais apropriados a cada tipo de solo.

## 2. Material e Métodos

### Localização da área de estudo

A bacia do riacho Mulungu está localizada no município de Belém de São Francisco no semi-árido de Pernambuco, entre as coordenadas geográficas 8° 32'00''S e 8° 35'00''S e 38° 48'00''W e 38° 52'00''W (Figura 1).

### Caracterização física da área de estudo

Cada atributo estruturador da paisagem física recebeu um valor de estabilidade/vulnerabilidade à erosão da bacia do riacho, de acordo com a metodologia proposta por Crepani et al. (1996), que possui como referência o trabalho de Tricart (1977) e pressupõe relações entre os componentes da paisagem que auxiliam os processos de pedogênese e ou morfogênese.

### Grande Unidade de Paisagem – Depressão Sertaneja

A área de estudo está totalmente localizada na Depressão Sertaneja (ZAPE, 2001). Para a área de estudo, as Unidades Geoambientais, que se aproximam em definição aos compartimentos morfoesculturais de Gerasimov & Mecherikov (1968), correspondem aos Pediplanos Arenosos (Q3), Pediplanos Avermelhados de textura média e argilosa (Q5) e Várzeas e Terraços Aluviais (Q11) (Figura 2).

### Geologia

A área de estudo encontra-se inserida, geologicamente, na Província Borborema, estando constituída pelos litótipos metamorfizados dos complexos Belém do São Francisco, Cabrobó, Floresta e Sertânia e Metagranitóides (Figura 3). Os litótipos associados a esses complexos são predominantemente migmatitos e gnaisses. Para o cálculo do índice de vulnerabilidade, é considerado o grau de coesão das rochas. Portanto, o elemento da Geologia levado em conta no cálculo do índice é a litologia e os valores de estabilidade/vulnerabilidade à erosão foram atribuídos para migmatitos e para gnaisses.

### Geomorfologia

As unidades geomorfológicas foram diferenciadas com base nos diversos processos morfogenéticos atuantes na área, que resultaram nas feições do modelado atual. Nelas predominam as superfícies aplainadas com baixa declividade, amplitude altimétrica e baixa dissecação do relevo, configurando níveis de pedimentos com entalhe de fluvial de incipiente a moderado e recobrimento generalizado por pavimentos detriticos *in situ*. A partir dessas informações foram gerados o modelo digital de elevação (MDE) e o mapa de declividade da bacia. Para efeito do cálculo do índice de vulnerabilidade à erosão, foi considerada as classes de declividade (Crepani et al., 1996), que recebem valores de estabilidade/vulnerabilidade à erosão variando de  $< 3,5\% = 1,0$  a  $> 50\% = 3,0$ .

### Solos

Devido ao mapeamento dos solos na escala dos dados de 1: 100.000 (ZAPE, 2001), não foi possível a visualização de todas as classes de solo observadas *in situ* na bacia. Nessa escala, foi possível visualizar no mapa apenas as seguintes classes: Luvisolos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Flúvicos, distribuídas conforme a Figura 4. No entanto, essas classes ocorrem em associações com outras classes de solos que não foi possível ser mapeada dentro dessa escala, devido à pequena proporção em que ocorrem. O banco de dados do ZAPE (2001) indica que as associações desses solos são

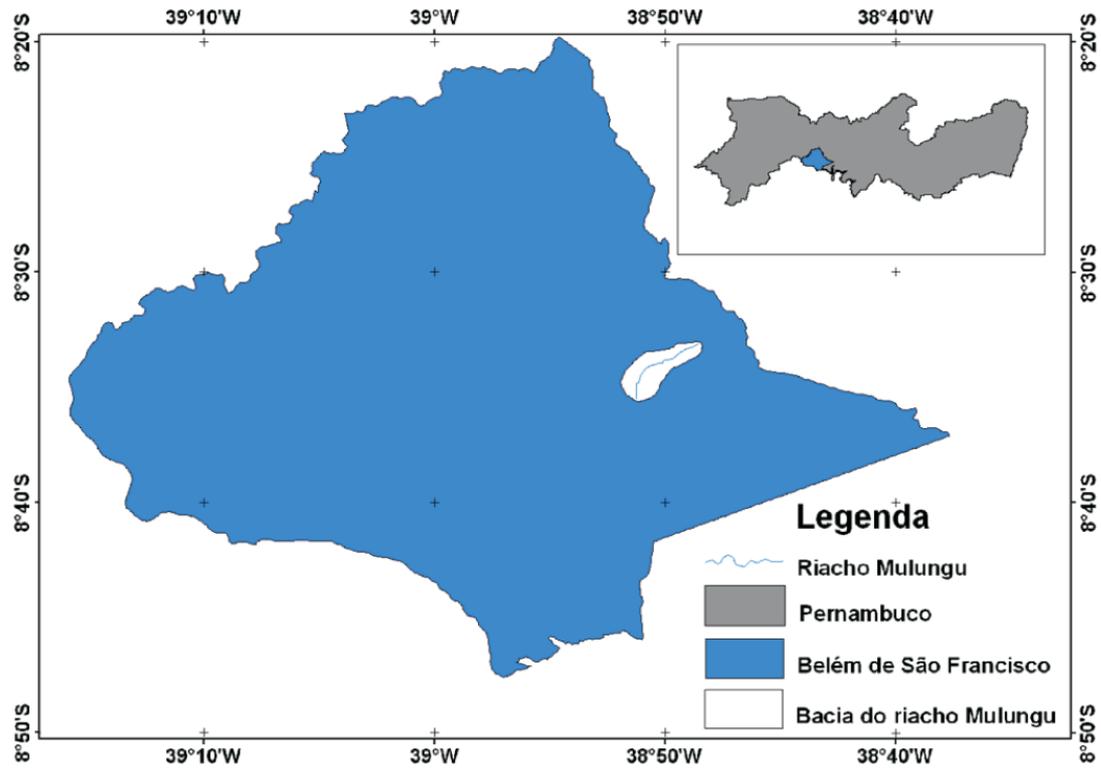


Figura 1 - Mapa de localização da bacia do riacho Mulungu, no município de Belém de São Francisco – PE.

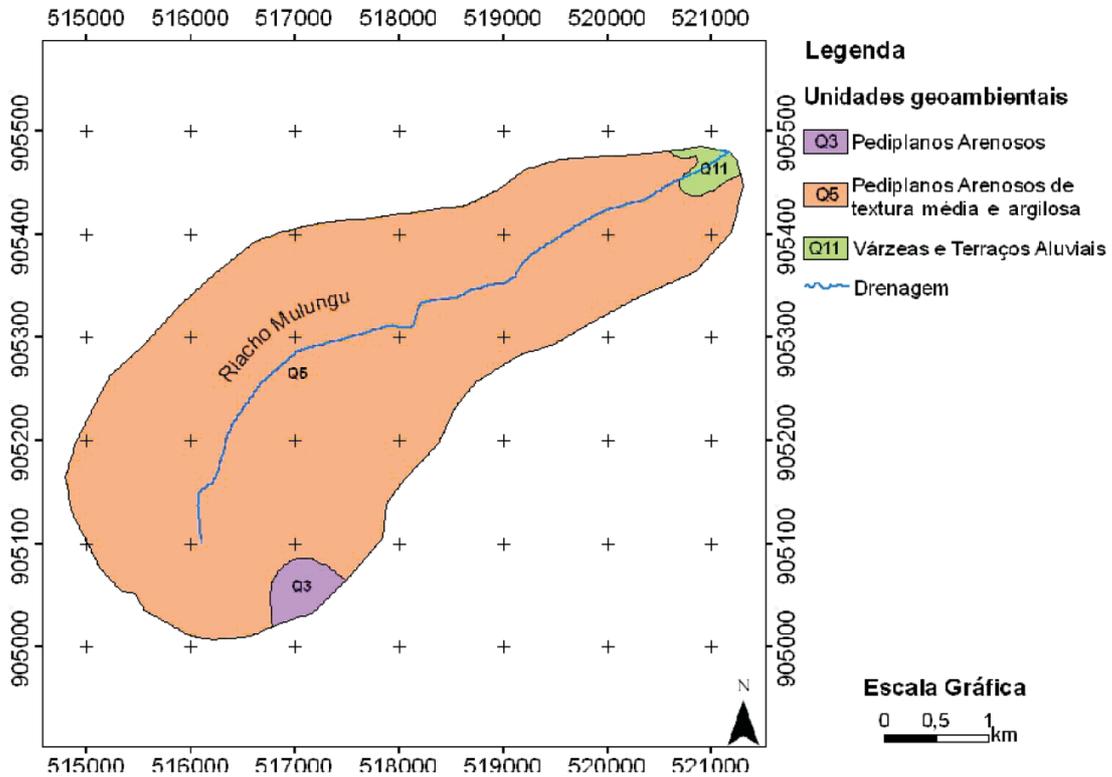


Figura 2 - Mapa de unidades geoambientais adaptado do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco. Fontes: ZAPE (2001) e Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

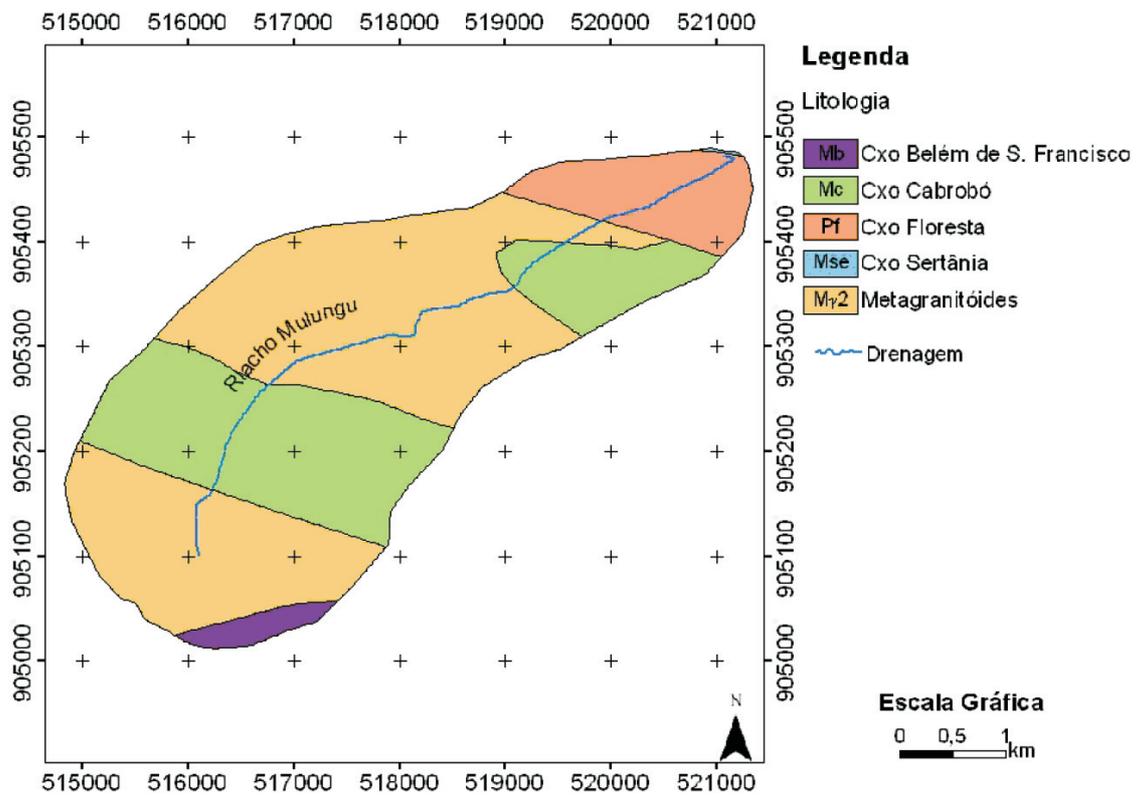


Figura 3- Mapa geológico simplificado da bacia do riacho Mulungu. Fonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

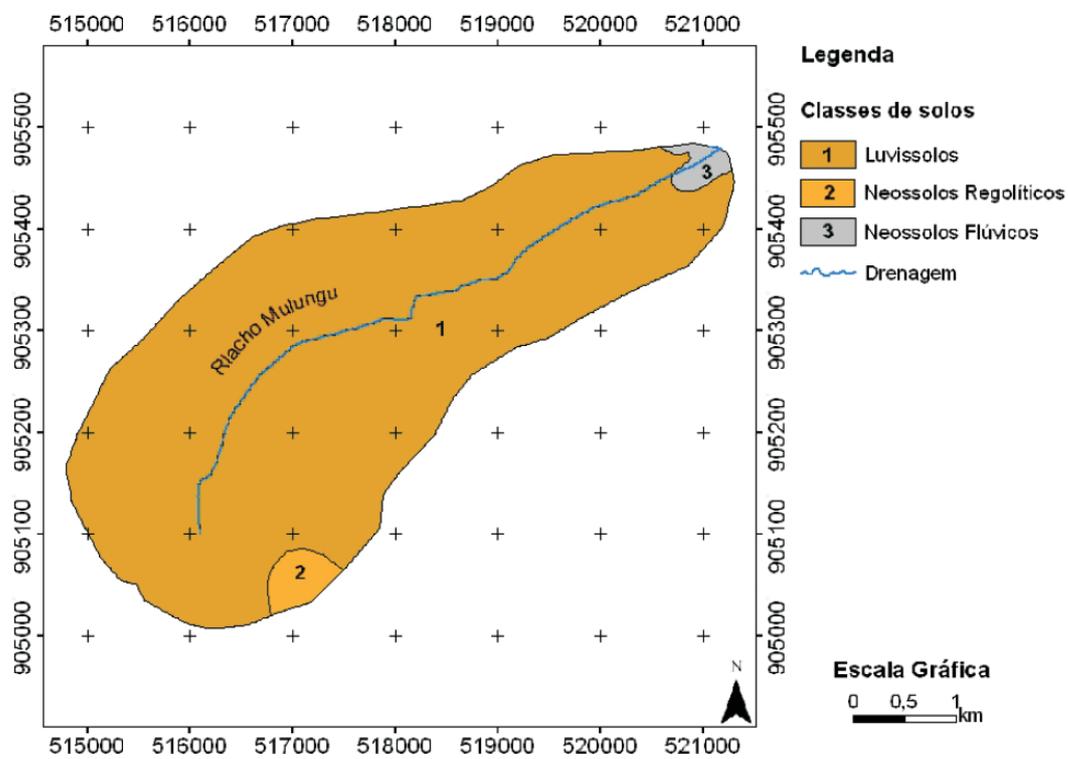


Figura 4 - Mapa das classes dominantes de solo da bacia do riacho Mulungu, município de Belém de São Francisco –PE. Fonte: ZAPE (2001).

formadas, além das classes citadas acima, por Planossolos Háplicos e Nátricos e Neossolos Litólicos (Tabela 1).

Tabela 1 - Associações dos solos da bacia do riacho Mulungu, município de Belém de São Francisco, PE.

Associações de solos que compõem a bacia do riacho Mulungu	Solos Componentes
1	Luvissole Planossolos Háplico e Nátrico Neossolo Litólico
2	Neossolo Regolítico Neossolo Litólico Planossolos Háplico e Nátrico
3	Neossolos Flúvicos Planossolos Háplico e Nátrico

Os números 1, 2 e 3 correspondem às classes de solos da figura 4, que ocorrem em associação com os solos indicados nesta tabela.

Fonte: ZAPE (2001).

O critério adotado para estabelecer os valores de estabilidade/vulnerabilidade à erosão, para cada classe de solo, é o seu grau de evolução. Neste contexto, as classes de solo identificadas na bacia do riacho Mulungu, receberam os seguintes valores: Luvissole e Planossolo Háplico e Nátrico = 2,0; e Neossolos Regolíticos, Litólicos e Flúvicos = 3,0.

## Clima

O clima da área de estudo é o tropical semi-árido, caracterizado pela insuficiência, irregularidade temporal e espacial das precipitações, temperaturas elevadas e fortes taxas de evaporação (Ab'Sáber, 1974; Ayoade, 1986; Nimer, 1989). De acordo com os dados das médias históricas de 1960 a 1990 do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande ([www.dca.ufcg.edu.br/clima/chuvape.htm](http://www.dca.ufcg.edu.br/clima/chuvape.htm) e [www.dca.ufcg.edu.br/clima/tsm.htm](http://www.dca.ufcg.edu.br/clima/tsm.htm)), os máximos de precipitação média para o município de Belém de São Francisco onde está inserida a bacia ocorrem entre os meses de janeiro a abril. O valor mínimo de precipitação média mensal ocorre no mês de agosto e é de 6 mm, já o valor máximo ocorre no mês de março e é de 99 mm. A temperatura média permanece durante todo o ano acima de 23°C, sendo a mínima verificada nos meses de julho (23,7°C) e a máxima verificada no mês de novembro (27,9°C).

Os valores de estabilidade/vulnerabilidade à erosão para o clima foram estabelecidos considerando a intensidade pluviométrica (média mensal, mm / mês). De acordo com Crepani et al. (1996), os valores variam de < 50 mm/mês = 1,0 a > 525 mm/mês = 3,0. Com os dados de precipitação média mensal para o município, o valor de estabilidade/vulnerabilidade para a bacia foi de 1,04. Este valor mascara o grau de erosividade nos meses mais chuvosos, cuja precipitação é originada por sistemas convectivos altamente energéticos e sua intensidade é muito superior a dos meses mais secos. Se considerarmos apenas os meses chuvosos, o

valor de estabilidade/vulnerabilidade à erosão na bacia será 3,0. Nesse caso, esse valor irá mascarar a influência da precipitação nos meses mais secos, que são, em número, maiores que os chuvosos e tem pouca influência nos processos erosivos. Assim, foi considerado um valor médio de 2,0 para representar o grau de estabilidade/vulnerabilidade do clima na bacia do riacho Mulungu.

## Vegetação

A vegetação típica do município de Belém de São Francisco é a savana estépica florestada, com plantas do estrato arbóreo e arbustivo, de acordo com classificação do IBGE (1992). Para a área específica da bacia do riacho Mulungu, a vegetação predominante é correspondente a plantas do estrato arbustivo aberto e estratos herbáceos escasso, confirmados por observações no campo.

A vegetação da área foi avaliada pelo índice de Vegetação da Diferença Normalizada – IVDN, que é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Ele foi obtido através da razão entre a diferença das refletividades do IV-próximo ( $\rho_{IV}$ ) e do vermelho ( $\rho_V$ ), pela soma das mesmas:

$$IVDN = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (1)$$

Onde,  $\rho_{IV}$  e  $\rho_V$  correspondem, respectivamente, as bandas 4 e 3 do Landsat 5 – TM.

Os índices de vegetação foram criados, entre outras coisas, para tentar diminuir o trabalho de análise dos dados orbitais, através da maximização de informações espectrais da vegetação no menor número de bandas de operação dos sensores. Eles têm o intuito de ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície (Moreira, 2003).

Embora numericamente os valores do IVDN possam variar entre -1 e 1, a vegetação está associada aos valores positivos. Materiais que refletem mais intensamente na porção do vermelho em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água e neve) apresentam IVDN negativo. Solos descobertos e rochas refletem o vermelho e o infravermelho próximo quase na mesma intensidade, por conseguinte, seu IVDN aproxima-se de zero (Rizzi, 2004).

Na avaliação da vegetação utilizando o IVDN, a assinatura espectral característica de uma vegetação verde e sadia mostra um evidente contraste entre a região do visível, especificamente no vermelho, e do infravermelho próximo, e quanto maior for esse contraste, haverá maior vigor da vegetação na área imageada. Esse é o princípio em que se baseiam os índices de vegetação que combinam informação espectral nestas duas bandas do espectro eletromagnético (Shimabukuro et al., 1998).

Os valores de estabilidade/vulnerabilidade pela metodologia de Crepani et al. (1996) são dados em função da classificação do tipo de vegetação da área (arbórea, arbustiva ou herbácea). Neste trabalho, os dados de vegetação foram determinados em função da proporção de cobertura da área da bacia, calculada pelo IVDN. Assim, os valores de estabilidade/vulnerabilidade à erosão foram estabelecidos em função das classes de IVDN determinadas.

### Uso do solo

Este atributo foi determinado a partir de observações feitas em campo. Os valores de Crepani et al. (1996) para este atributo são em função da vegetação, cultivada ou nativa, e solo exposto. Para a área da bacia, além dessas atividades, existe também a pecuária extensiva. A área mais visivelmente erodida da bacia foi a área com cultivo juntamente com a pecuária extensiva, e a menos erodida, foi a área que estava coberta com vegetação nativa. Assim, foi atribuído o valor 1,0 para a área com caatinga mais preservada e pastagem; 2,0 para a área com apenas cultivo e caatinga antropizada; e 3,0 para áreas de solo exposto e de cultivo juntamente com a pecuária extensiva.

### Procedimentos para realização da caracterização física da bacia

O riacho Mulungu foi identificado através de uma base digital de rios cedida pela CPRM, digitalizado da folha Floresta – MII442 da SUDENE, na escala de 1:100.000. Através da imagem de radar da articulação SC-24-X-A, disponibilizada pela Embrapa Monitoramento por Satélite, foram obtidas as informações sobre o relevo, geradas pelo projeto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A partir destas informações foi possível extrair a área da bacia do riacho Mulungu utilizando o IDRISI ANDES 15.0. A mesma imagem (SC-24-X-A) serviu para a elaboração do MDE (Modelo Digital de Elevação) e mapa de declividade da bacia. Os modelos digitais de elevação com o uso do geoprocessamento possibilitam a observação de padrão de drenagem e uso da terra e têm se tornado uma ferramenta poderosa e de baixo custo no reconhecimento e identificação de classes de solos (França & Demattê., 1993).

Para confeccionar os mapas de unidades geoambientais e de solos, foi utilizada a base de dados digitais do ZAPE (2001), na escala de 1:100.000. Para o mapa geológico, a base de dados digital utilizada foi a do Mapa Geológico do Município de Belém de São Francisco, cedida pela CPRM, na escala de 1:250.000.

O mapa da situação da vegetação foi confeccionado a partir dos dados do IVDN e finalizado numa escala gráfica de 1:40.000. Para calcular o índice de vegetação foi utilizada a imagem de satélite Landsat 7 ETM+ obtida no *site* do Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais (<http://www.dgi.inpe.br>). Para minimizar efeitos de *background*, foi escolhida uma imagem do período chuvoso, onde a vegetação de caatinga se mostra mais exuberante (Galvêncio et al., 2006).

A passagem do satélite Landsat 7 sobre Belém de São Francisco da qual foi gerada a imagem utilizada, ocorreu no dia 13 de março de 2002 (Dia Juliano, DJ=73), na órbita 216 e ponto 66.

### Estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão da bacia

Para cada atributo estruturador da paisagem física – Geologia (litologia), Geomorfologia (declividade), Pedologia (classe de solo), Clima (intensidade de precipitação); Vegetação (proporção de cobertura da área); e Uso do Solo (tipo de uso) – foi calculado um valor médio de estabilidade/vulnerabilidade entre seus diversos elementos, quando foi o caso. No caso do atributo possuir apenas um elemento, foi considerado o seu valor como média para o atributo.

Para o cálculo da estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão da bacia como um todo, foi feita uma média aritmética dos valores médios dos atributos estruturadores da paisagem.

Os valores de estabilidade/vulnerabilidade à erosão, que variam de 1 a 3, são interpretados de acordo com o grau de predomínio dos processos morfogenéticos e pedogenéticos. Nas situações de predomínio dos processos de pedogênese, foram atribuídos valores iguais ou próximos a 1,0. Nas situações de predomínio dos processos de morfogênese, foram atribuídos valores iguais ou próximos a 3,0. Nas situações intermediárias, foram atribuídos valores iguais ou próximos a 2,0 (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de estabilidade de unidades de paisagens para avaliação da suscetibilidade a erosão.

Unidade	Relação pedogênese / morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1
Intermediária	Equilíbrio entre pedogênese e morfogênese	2
Instável	Prevalece a morfogênese	3

Adaptado de Tricart (1977)

## 3. Resultados e Discussão

A morfologia aplainada da Depressão Sertaneja apresenta-se por vezes conservada, mas em grande parte está submetida a maiores níveis de dissecação à medida que aumenta a densidade e aprofundamento do entalhe da drenagem (Figura 2). As características mais importantes desta unidade de paisagem estão relacionadas com a diversificação litológica devido à ocorrência de rochas cristalinas e sedimentares de diversas origens e idades (Figura 3).

O modelo digital de elevação (MDE) a declividade da bacia (Figuras 5 e 6, respectivamente) demonstram que ocorre uma mudança suave de um patamar de aplainamento para

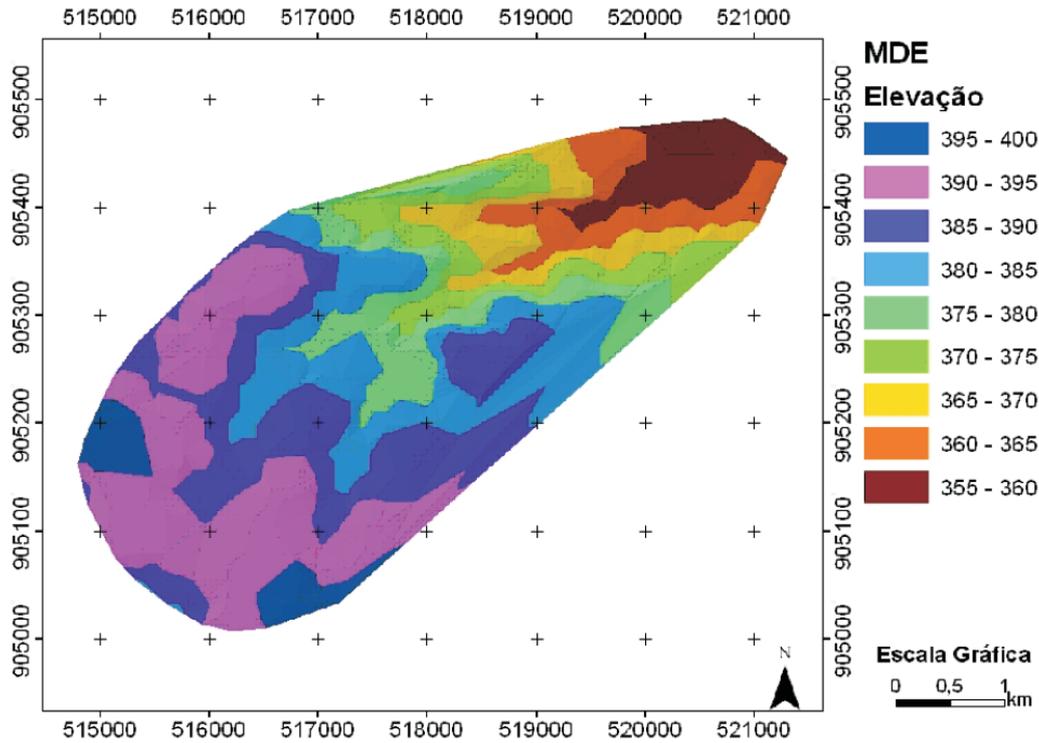


Figura 5 - Mapa do modelo digital de elevação do riacho Mulungu, município de Belém de São Francisco – PE, a partir de dados da SRTM.

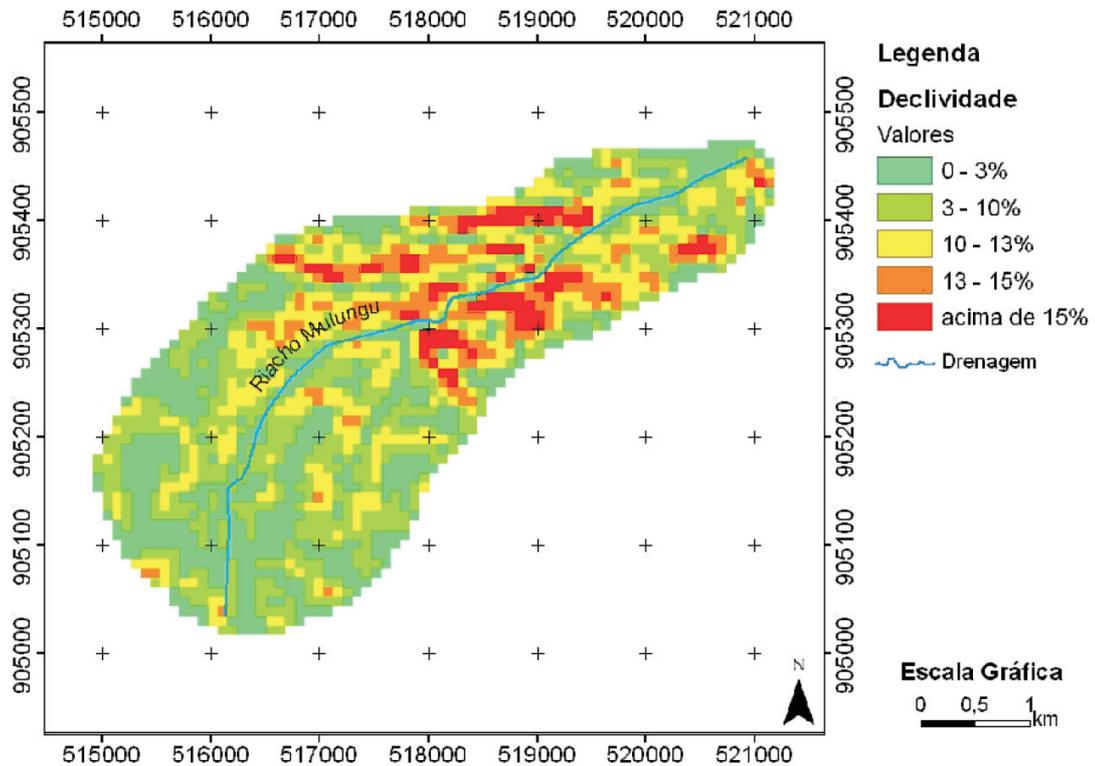


Figura 6 - Mapa de declividade da bacia do riacho Mulungu, município de Belém de São Francisco – PE, gerado a partir de dados da SRTM

outro, sem rupturas bruscas, demonstrando uma área denudacional com declives suaves, característica dos pedimentos elaborados no ambiente semi-árido. Essa estrutura favorece a erosão laminar, mais sutil que a erosão linear no que se refere às formas que ela elabora. No entanto, a extensa cobertura das cimeiras planas das rampas pedimentadas por cascalheiras *in situ* denota a eficácia da erosão em lençol ao remover as frações mais finas.

A pedogênese influencia no sistema morfodinâmico através das características de maturidade e profundidade dos solos, produtos diretos do balanço morfogênese/pedogênese, que atuam diretamente sobre a disponibilidade de materiais para a ação do modelado. As características pedogenéticas estão diretamente associadas às classes de solos, que na bacia do riacho Mulungu ocorrem predominantemente Luvisolos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Flúvicos (ZAPE, 2001).

Os Luvisolos são solos minerais pouco profundos e rasos, não hidromórficos, com argila de atividade alta, eutróficos, com horizonte A de consistência dura a muito dura, quando secos, estrutura maciça ou em blocos fracamente desenvolvidos, seguido por um horizonte B pouco espesso realçado pela cor vermelha, usualmente com mudança textural abrupta (entre o horizonte A e o B), estrutura em blocos bem desenvolvidos (Oliveira et al., 1992). São solos que apresentam uma tendência muito forte a erosão e ocorrência de forte pedregosidade na superfície. A utilização desses solos é restrita, devido ao clima das áreas onde ocorrem, à pedregosidade e à pouca profundidade. Na bacia do riacho Mulungu seu uso é principalmente com pecuária extensiva (Brasil, 1983), com capacidade de suporte geralmente excedida, vindo a caracterizar o sobre-pastoreio, um problema relacionado à intensificação dos processos erosivos em ambientes semi-áridos.

Os Neossolos Regolíticos são solos jovens de textura arenosa, pouco profundos (< 100 cm e > 50 cm) a profundos, com seqüência de horizontes A/C, com teores de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo superiores a 4% (principalmente feldspatos) nas frações areia e cascalho. São solos excessivamente bem drenados, podendo apresentar horizontes endurecidos em alguma parte do C, denominados de fragipã e/ou duripã (Oliveira et al., 1992).

Os Neossolos Flúvicos são solos desenvolvidos de sedimentos recentes, geralmente de origem fluvial, constituído de camadas alternadas e, freqüentemente, de classes texturais distintas (dependente do depósito aluvial transportado), sem guardar correspondência pedogenética, entre si. Apresenta um horizonte A, assentado diretamente sobre um horizonte C, constituído por estratos de depósitos sedimentares (Oliveira et al., 1992). São solos pouco susceptíveis à erosão, principalmente devido a sua posição na paisagem. Na área

estudada seu uso tem sido com cultivo de milho e feijão e pecuária extensiva.

Em associação às classes de solos acima descritas, estão os Planossolos, Háplicos e Nátricos, e os Neossolos Litólicos. Os Planossolos compreendem solos minerais hidromórficos ou não, com mudança textural abrupta (Oliveira et al., 1992). O horizonte A de textura arenosa ou média está sobre um horizonte B de textura argilosa, apresentando cores de redução e/ou mosqueado resultantes de drenagem imperfeita ou má e com estrutura em blocos subangulares e/ou angulares ou ainda, prismática. A mudança textural abrupta é de tal forma marcante que se forma, no solo seco, uma superfície dita de fraturamento entre o horizonte B e o A, favorecendo enormemente os processos erosivos. Eles ocorrem preferencialmente em áreas de relevo plano ou suave ondulado, onde as condições ambientais e do próprio solo favorecem vigência periódica anual de excesso de água, mesmo que de curta duração, especialmente em regiões sujeitas à estiagem prolongada. Estes solos tendem à salinização (Planossolos Nátricos) devido à alta evaporação no clima semi-árido, associada às características mineralógicas do material de origem. Na área estudada, o uso tem sido com pecuária extensiva e o cultivo de feijão.

Os Neossolos Litólicos compreendem solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso (menos de 50 cm) com pequena expressão dos processos pedogenéticos, em consequência da baixa intensidade de atuação destes, que não conduziram, ainda, a modificações expressivas do material parental, das características do próprio material de origem, pela resistência ao intemperismo ou composição química, e de relevo, que podem impedir ou limitar a evolução destes solos. Os limites de utilização são atribuídos à pequena espessura, que dificulta a penetração do sistema radicular das plantas (Oliveira et al., 1992). Essa limitação é acentuada no semi-árido devido à escassez de água.

O IVDN, que é um índice que mede a quantidade e a condição da vegetação verde, não ultrapassou o valor de 0,68 em nenhum ponto da bacia do riacho Mulungu (Figura 7). De acordo com as observações *in situ*, a vegetação típica trata-se de uma caatinga com setores antropizados, em fase de regeneração.

Os valores do IVDN entre 0 e 0,23 correspondem a áreas com alto grau de susceptibilidade à morfogênese; as com valores entre 0,23 e 0,35 correspondem a áreas com grau médio; e as com valores entre 0,35 e 0,68 correspondem às áreas de baixo grau. A presença da cobertura vegetal representa a proteção da superfície da paisagem contra a ação dos processos morfogenéticos que se traduzem em erosão, atuando em diversas escalas espaciais e temporais (Paton, 1978; Erhart, 1956). Como foi observado na área de estudo, a

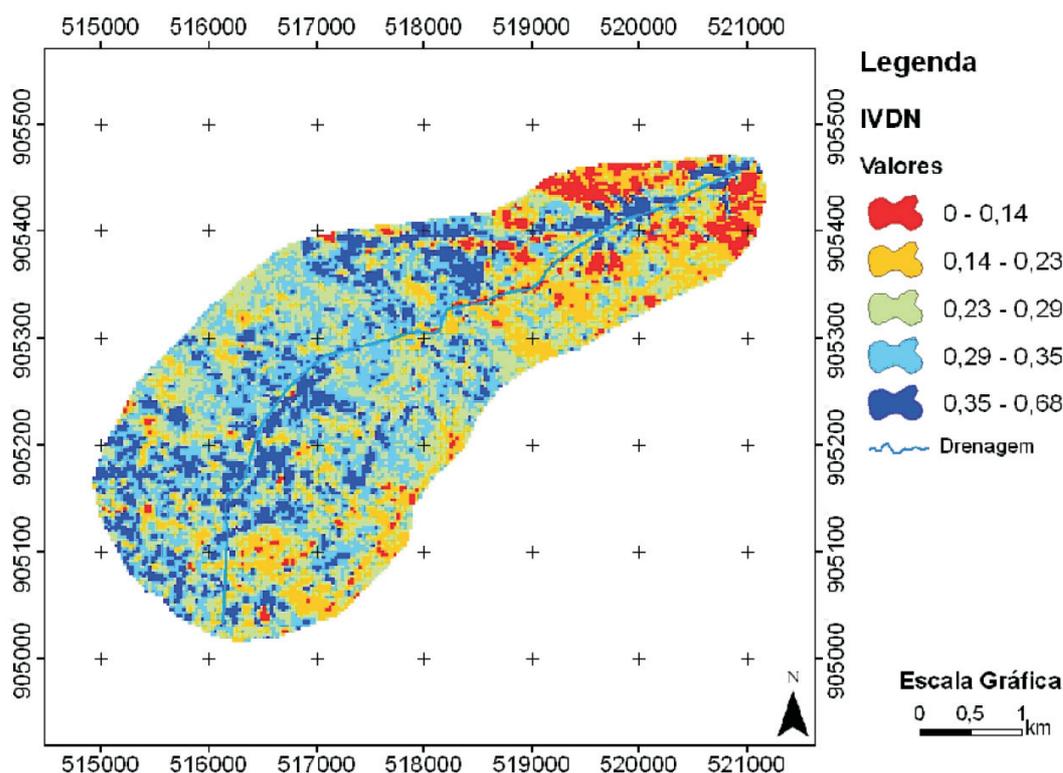


Figura 7 - Mapa da situação da vegetação no âmbito da bacia do riacho Mulungu confeccionado a partir de dados do índice vegetal da diferença normalizada.

cobertura vegetal quando existente é esparsa, sendo pouco eficaz no controle da erosão.

Esse fato deve ser considerado no momento de estabelecer padrões para o uso do solo em áreas restritas devido ao alto grau de susceptibilidade à erosão. De certo que apenas esses dados não são suficientes para determinar que práticas devam ser adotadas na região, no entanto, já permitem identificar as áreas mais críticas.

#### Índice de vulnerabilidade considerando a geologia

Os gnaisses por apresentarem bandeamentos que podem ser explorados pela erosão diferencial apresentam valor de vulnerabilidade/estabilidade igual a 2,5 e os migmatitos, por serem rochas resistentes, apresentam valor de vulnerabilidade/estabilidade igual a 1,0 (Crepani et al., 1996). A média considerada para esse critério ficou com o valor de vulnerabilidade/estabilidade igual a 1,75.

#### Índice de vulnerabilidade considerando a geomorfologia

As classes de declividade na bacia estão nos intervalos de 0 a 3%, de 3 a 10%, de 10 a 13% e de 13 a 15% e para cada uma os valores de estabilidade/vulnerabilidade são, res-

pectivamente, igual a 1,0; 1,1; 1,4 e 1,5 (Crepani et al., 1996). O modelo digital de elevação demonstra o predomínio de rupturas suaves entre os patamares de relevo, que não chegam a definir *knickpoints* bem marcados nem mesmo ao longo da drenagem principal. Devido à predominância das superfícies planas a suaves onduladas contíguas, o valor de vulnerabilidade/estabilidade foi considerado igual a 1,25.

#### Índice de vulnerabilidade considerando os tipos de solos

Diferentes tipos de solo podem apresentar susceptibilidade diferenciada à erosão, mesmo para condições semelhantes de declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo. Essas diferenças são devidas as suas propriedades e são denominadas erodibilidade do solo (Bertoni & Lombardi Neto, 1985). O valor médio de vulnerabilidade/estabilidade à erosão para este atributo estruturador foi calculado pela média dos valores de vulnerabilidade/estabilidade de cada tipo de solo, que foi de 2,5.

#### Índice de vulnerabilidade considerando a vegetação

A cobertura vegetal de caatinga arbustiva aberta observada no local seria regularmente incapaz de evitar os efeitos erosivos em larga escala, mesmo se estivessem mantidas

suas condições prístinas de estabilidade. Além disso, a cobertura vegetal observada apresenta setores em fase de regeneração, nitidamente impactados pelas atividades tradicionais de uso da terra. Portanto, o valor de vulnerabilidade/estabilidade considerado para este elemento de análise foi 3,0 onde a vegetação apresentou IVDN entre 0,14 e 0,23; 2,5 onde a vegetação apresentou IVDN entre 0,23 e 0,35; e 2,0 onde o IVDN variou entre 0,35 e 0,68. O valor médio de vulnerabilidade/estabilidade à erosão para este atributo estruturador foi 2,5.

#### Índice de vulnerabilidade considerando o uso do solo

O valor vulnerabilidade/estabilidade à erosão para este atributo foi calculado com a média dos valores para cada tipo de uso observado *in situ* na bacia do riacho Mulungu, que foi de 2,0.

#### Índice geral de vulnerabilidade da bacia

Este índice foi estimado a partir dos valores médios de vulnerabilidade/estabilidade à erosão de cada atributo estruturador - litologia, declividade, classe de solo, vegetação, clima e uso do solo. Este valor estimado foi de 2,0 para a vulnerabilidade/estabilidade morfodinâmica da bacia do riacho Mulungu. Ou seja, a área da bacia se encontra num equilíbrio entre a morfogênese e a pedogênese.

#### 4. Conclusão

A bacia do riacho Mulungu apresentou um índice médio de vulnerabilidade igual 2,0 o que representa, pela escala de Tricart um grau intermediário de propensão à erosão. Embora o índice tenha identificado um grau de equilíbrio morfodinâmica no âmbito da bacia como um todo, existem pequenos setores em que os processos de morfogênese são intensificados. A vegetação antropizada não consegue desempenhar um papel efetivo contra os processos erosivos. As chuvas concentradas entre janeiro e abril encontram o solo praticamente desnudo, em face do caráter decíduo da vegetação e das práticas agrícolas tradicionais, favorecendo a morfogênese e a produção de sedimentos grossos que demandam a calha fluvial.

No entanto, a utilização de um índice agregado para toda a bacia, apesar de sua reduzida dimensão espacial, não permite definir o papel de cada elemento estruturador dos sistemas de superfície terrestre, que atuando em consórcio e sinergicamente, respondem pelo grau de morfogênese e produção de sedimento dentro da unidade de paisagem estudada (bacia do riacho Mulungu). Uma análise discreta da interação entre os diversos sub-sistemas espacializados (parâmetros morfológicos, distribuição e caráter das forma-

ções superficiais, uso da terra, cobertura vegetal residual, etc.) e a dinâmica processual dentro da bacia assumem portanto um significado crítico quando da implementação de ações de mitigação dos efeitos indesejados da erosão com vistas a um ordenamento espacial da pauta econômica do semi-árido nordestino a partir dos micro-espacos de vivência de sua população, e em escala regional, à própria requalificação ambiental da bacia do rio São Francisco.

#### Referências

- Ab'saber, A.N. (1974) *O domínio morfoclimático semi-árido das caatingas brasileiras*. Geomorfologia, 43: 1-39.
- Ayoade, J.O. (1986) *Introdução à Climatologia para os Trópicos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 332p.
- Bertoni, J. & Lombardi Neto, F. (1985) *Conservação do solo*. Piracicaba: Editora Livrocercos. 392 p.
- Brasil. Ministério das Minas e Energia. Secretária-Geral. Projeto Radambrasil. (1983) *Folhas SC 24/25 Aracaju/Recife: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro: MME/Secretária-Geral, 856p. il., 7 mapas. (Levantamento de Recursos Naturais, 30).
- Crepani, E.; Medeiros, J.; Filho, P.; Florenzano, T.G. & Duarte, V. (1996) Uso de sensoriamento remoto no Zoneamento Ecológico-Econômico. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador. *Anais do VIII SBSR*, São José dos Campos: INPE, p. 129-135.
- Erhart, H. (1956) La theorie bio-rexistesique et les problemes biogeographiques et paleobiologiques. *Soc. Biogeogr.*, France, CNR (288): 43-53.
- França, G.V. de & Demattê, J.A.M. (1993) Levantamento de solos e interpretação fotográfica dos padrões desenvolvidos em solos originados do arenito Bauru. *Scientia Agricola* (Piracicaba), 50 (1): 77-86.
- Galvínio, J.D.; Araújo, M.S.B; Corrêa, A.C.B. (2006). Determinação do IVDN e da fração de cobertura vegetal do Município de Belém do São Francisco – PE. In: SÁ, A.J; CORRÊA, A.C.B. (Orgs.). *Regionalização e análise regional: perspectivas e abordagens contemporâneas*. Recife: Ed. Universitária UFPE, p. 203-214.
- Gerasimov, I.P. & Mescherikov, J.A. (1968) Morphostructure. In: Fairbridge, R.W. (Ed.). *The encyclopedia of geomorphology*. New York: Reinhold Book Co., p. 731-732.

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (1992) *Manual técnico da vegetação brasileira*. Rio de Janeiro: IBGE. (Série Manuais Técnicos em Geociências, n.1). 92 p.
- Leprun, J.C. & Silva, F.B.R. (1995) Les dégradations des sols en régions semi-arides au Brésil et en Afrique de l'Ouest. Comparaison et conséquences. Suggestions sur leurs réhabilitations respectives. In: Pontanier, R.; M'Hiri, A.; Akrimi, N.; Aronson, J. (Orgs.). *Le Floc'h, E. L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait?* Paris: John Libbey Eurotext. p. 267-291.
- Moreira, M.A. (2003) *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 2. ed. Viçosa: UFV, 307 p.
- Morisawa, M. (1968) *Streams: their dynamics and morphology*. New York: McGraw-Hill Book Company, 175 p.
- Nimer, E. (1989) *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 421 p.
- Oliveira, J.B.; Jacomine, P.K.T. & Camargo, M.N. (1992) *Classes gerais de Solos do Brasil. Guia Auxiliar para seu Reconhecimento*. Jaboticabal: FUNEP, 201 p.
- Paton, T.R. (1978) The formation of soil material. London: George Allen & Unwin, 143p.
- Rizzi, R. (2004) *Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul*. 212 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP).
- Sampaio, E.V.S.B. & Salcedo, I.H. (1997). Diretrizes para o manejo sustentável dos solos brasileiros: região semi-árida. In: Congresso Brasileiro de Ciência de Solo, 26., Rio de Janeiro. Anais, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 33p.
- Sampaio, E.V.S.B.; Sampaio, Y.; Vital, T.; Araújo, M.S.B.; Sampaio, G.V. (2003). *Desertificação no Brasil – Conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência*. Recife: Editora Universitária da UFPE, 202p.
- Serviço Geológico do Brasil - CPRM. (2005) Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Belém de São Francisco, estado de Pernambuco. Recife: CPRM/ PRODEEM. 11 p.
- Shimabukuro, Y.E.; Batista, G.T.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C. Duarte, V. (1998) Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper of the Amazon Region. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (3): 535-541.
- Silva, F.B.R.S.; Santos, J.C.P.; Silva, A.B.; Cavalcanti, A.C.; Silva, F.H.B.B.; Burgos, N.; Parahyba, R.B.V.; Oliveira Neto, M.B.; Souza Neto, N.C.; Araújo Filho, J.C.; Lopes, O.F.; Luz, L.R.Q.P.; Leite, A.P.; Barros, A.H.C. & Varejão-Silva, M.A. (1998) *ZAPE - Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco*. Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento - UEP Recife; Governo do Estado de Pernambuco (Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária). CD-ROM. (Embrapa Solos. Documentos; no. 35). ZAPE Digital.
- Tricart, J. (1977) *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN (Recursos Naturais e Meio Ambiente), 91p.
- Walling, D.E. & Webb, B.W. (1996) Erosion and Sediment yield: Global and Regional Perspectives. In: D.E. Walling and B. W. Webb (Eds.). *Erosion and Sediment yield: global and regional perspectives*. Proc. Exeter Symp., IAHS Publ. vol. 236, p. 3-19.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978) *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington: USDA. (Agricultural Handbook 537). 58 p.