

# ELABORAÇÃO DO MAPA DE PREDISPOSIÇÃO À EROSÃO NA MICROBACIA DO RIO ARACATIAÇU (CE) UTILIZANDO TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

Francisca Carisa Andrade Gonçalves<sup>1</sup>  
Johnson Fernandes Nogueira<sup>2</sup>

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a geração do mapa de predisposição à erosão da microbacia do rio Aracatiaçu. A metodologia utilizada foi proposta por Zuquette (1993) e reaplicada por Guerra (1998), dividida em três etapas: aquisição, digitalização e tratamento das cartas-base (fitologia, geologia, pedologia e altimetria) utilizando um sistema de CADD e o sistema de informação geográfica SPRING 4.3; elaboração da carta de declividade utilizando modelagem numérica de terreno; elaboração do mapa de predisposição à erosão, utilizando suporte à decisão (AHP). O mapa final apresenta cinco classes de predisposição: muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa.

Palavras-chave: Erosão. Predisposição à erosão. Mapeamento. Geoprocessamento.

## THE GENERATION OF THE EROSION SUSCEPTIBILITY MAP FOR ARACATIAÇU BASIN, IN CEARÁ, BRAZIL

### ABSTRACT

This research had as main objective the generation of the erosion susceptibility map for Aracatiaçu Basin, Ceará State, NE Brazil. The methodology used was developed by Zuquette (1993) and Guerra (1998), and divided in three stages: acquisition, digitalization, and processing of base maps (vegetation, geology, soils, and altimetry) using a CADD system and SPRING 4.3 geographical information system; creation of slope map using digital elevation modeling; creation of erosion susceptibility map using decision support tools. The resulting map shows five susceptibility classes: very high, high, moderate, low, and very low.

Key-words: Erosion. Erosion susceptibility. Maps processing. Geoprocessing.

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão é um processo natural quando é causada por atividades geológicas que, ao atuarem no decorrer de longos períodos, efetuam modificações no relevo da crosta terrestre, mode-

---

<sup>1</sup> Bacharela em Geografia; técnica da Secretaria de Cultura, Turismo e Meio Ambiente de Amontada-CE. E-mail: carisag@bol.com.br.

<sup>2</sup> Doutor em Geociências; professor do curso de Geografia da Universidade Estadual Vale do Acaraú. E-mail: johnsonnogueira@yahoo.com.

lando-o (GOMES, 1998). Este processo tem sido acelerado pela ação humana, que com suas atividades, seja pela construção de moradias, estradas ou para a produção de alimentos, acaba por romper o equilíbrio entre a velocidade de formação ou renovação do solo e denudação.

Para estudar a erosão, dispõe-se de métodos diretos, baseados na coleta de material erodido, em campos experimentais ou em laboratório, ou ainda de métodos indiretos, por meio de modelagem matemática. Estes modelos podem ser associados às técnicas de geoprocessamento, que permitem análises espaciais do fenômeno, visando ao planejamento racional do uso e ocupação do solo e na exposição das áreas que necessitam de práticas de controle da erosão.

O presente trabalho teve como objetivo entender a contribuição de alguns fatores que controlam a erosão do solo (parâmetros geoambientais – geologia, declividade, solos e cobertura vegetal), de modo a identificar as áreas com predisposição à ocorrência desse processo. Desta forma, foi gerado um mapa de predisposição à erosão para a microbacia do rio Aracatiaçu, para facilitar o entendimento do processo erosivo, bem como servir de base para disciplinar as intervenções, principalmente nas áreas mais suscetíveis à erosão.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a microbacia do rio Aracatiaçu, situada na porção norte no Estado do Ceará. Possui uma área de 3.055 km<sup>2</sup>, delimitada pelas longitudes 39°30'00"W e 40°15'00" e pelas latitudes 2°55'00"S e 4°15'00" e abrangendo os municípios de Irauçuba, Miraíma, Amontada e parte do município de Sobral, como pode ser observado na Figura 1b. As principais vias de acesso a partir da capital do Estado são as rodovias BR 222, BR 402 e a CE 176, como também pode ser observado na Figura 1b. O rio Aracatiaçu, principal curso de água desta microbacia, espacializado na Figura 1b, percorre cerca de 80 km, da nascente localizada na Serra Verde no município de Irauçuba até desaguar no Oceano Atlântico no município de Amontada. Seus principais afluentes são os rios Missi e Pajé (Figura 1b).

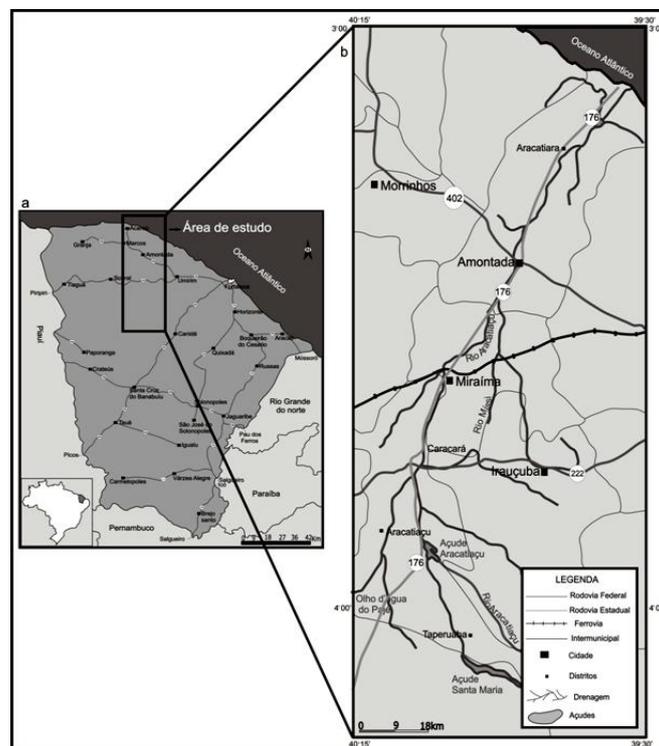


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo no Estado do Ceará (a). Área de estudo e suas principais vias de acesso, os limites municipais e os cursos de água (b).

A litologia da microbacia do rio Aracatiaçu mostra um predomínio das rochas do embasamento cristalino que datam do Pré-Cambriano inferior e médio. Estas rochas cristalinas são agrupadas nas unidades estratigráficas do Complexo Ceará e do Complexo Tamboril – Santa Qui-

téria. Há também a ocorrência de rochas sedimentares cenozóicas; as mesmas estão agrupadas no Grupo Barreira, dunas e paleodunas.

Em termo da geomorfologia, a microbacia compreende porções da Depressão Sertaneja, Maciços Residuais Secos, Planície Fluvial, Tabuleiro Pré-Litorâneo e Planície Litorânea. No alto curso do rio Aracatiaçu ocorrem os Maciços Residuais Secos, que compreendem serras cristalinas que apresentam extensões variadas e altitudes entre 400 e 800m e raramente ultrapassam as cotas de 900m. Cerca de 80% da área em estudo encontra-se na depressão sertaneja, com altitudes inferiores a 400m e uma vasta superfície de aplainamento. A planície fluvial do rio Aracatiaçu está entre as mais expressivas do Estado do Ceará. Nesta planície pode ser observado setor como a vazante, que compreende o talvegue e o leito menor do rio, podendo ser submetido a cheias periódicas. A planície litorânea na área de estudo é composta pelas seguintes feições morfológicas: dunas formadas por sedimentos areno-quartzosos, tabuleiros pré-litoraneos modelados por sedimentos terciários do Grupo Barreiras, a planície flúvio-marinha localizada em áreas sob influência de maré, além de feição morfológica pós-praia.

Na área da microbacia do rio Aracatiaçu é possível identificar sete classes de solos, sendo que solonchak, solonetz sodizado, areias quartzosas distróficas e marinhas predominam ao norte da referida área. O planossolo solódico, podzólico vermelho amarelado eutrófico e distrófico encontra-se no centro sul da microbacia, com pontos esporádicos a leste e no extremo sul. A classe de solo brunos não cálcicos predomina ao sul, os solos litólicos eutróficos e distróficos encontram-se a leste e sudeste, com pontos esporádicos ao sul da área em análise.

A microbacia do rio Aracatiaçu faz parte da região hidrográfica do litoral. O rio Aracatiaçu é caracterizado por uma drenagem exorréica; quanto ao tipo de canal, o rio em questão tem um padrão anastomosado, que é muito comum no ambiente semi-árido.

A área de estudo encontra-se dentro do semi-árido, que tem como principal característica a irregularidade das chuvas, aliada às altas taxas de temperatura, o que provoca alto percentual de evaporação das águas e transpiração das plantas. A água é acumulada nas estações chuvosas, que duram entre três e quatro meses. Nos meses seguintes são comuns temperaturas elevadas, com uma média em torno de 25 a 29° C, além de uma intensa radiação e insolação diária entre 8 a 9 horas (BEZERRA; BEZERRA; MENDES, 1997). É interessante destacar que a água é escassa, tanto pelas chuvas serem mal distribuídas, como pelos solos serem muito rasos, dificultando o armazenamento da água.

Quanto às precipitações na área em análise, podemos perceber a dependência da distribuição e quantidade de chuva em relação ao relevo, bem como da posição das massas de ar e sistemas de vento da circulação planetária. Segundo o IPECE (2002), a faixa litorânea apresenta uma média anual de 1.350mm ao ano, enquanto no alto curso, os totais pluviométricos variam de 550-850 mm ao ano, e no médio curso mantêm uma média de 950-1000 mm ao ano.

Com relação à vegetação, a parte norte da microbacia apresenta-se recoberta pelo complexo vegetacional da zona litorânea, pela floresta perenifólia paludosa marítima e por mata ciliar com carnaúba e dicotiledôneas. A caatinga arbustiva aberta ocorre na região central e a sudoeste da microbacia, enquanto que a caatinga arbustiva densa encontra-se a sudeste e sul da área.

### 3 MATERIAL E MÉTODO

A metodologia adotada para realização deste trabalho foi proposta por Zuquette (1993) e reaplicada por Guerra (1998), sendo adaptada para utilização do Sistema de Informação Geográfica SPRING, versão 4.3, com a finalidade de agilizar o tratamento, modelamento e análise dos diferentes parâmetros que foram considerados na elaboração do mapa de predisposição à erosão da microbacia do rio Aracatiaçu.

O primeiro passo foi criar um banco de dados geográfico que corresponde fisicamente a um diretório onde foram armazenados os dados. O passo seguinte foi criar um projeto cuja superfície está delimitada pelas coordenadas em longitude 40°15'00"/39°30'00"W e latitude 4°15'00"/2°55'00"S. A delimitação do projeto teve como base a área de estudo – a microbacia do rio Aracatiaçu. O processo de georreferenciamento foi projetado no sistema de coordenadas U-

universal Transversal de Mercator (UTM), zona 23, elipsóide SAD 69, meridiano central 39° W. Também foram definidas categorias e classes temáticas às quais pertenceriam os dados.

O segundo passo foi a entrada de dados que, segundo Guerra (1998), pode ser considerada uma das etapas mais importantes de um projeto, principalmente quando se pretende utilizar um sistema de informações geográficas para tratamento dos mesmos. Nesse trabalho, a entrada de dados diz respeito à digitalização e edição das feições referentes aos parâmetros do meio físico (geologia, pedologia e fitologia), bem como às amostras de altimetria, na forma de curvas de iso-valores e pontos tridimensionais.

Também há entrada de dados no formato imagens. Estas foram importadas no formato de Geotiff (já georreferenciadas em trabalhos anteriores) e as bandas do LANDSAT 7 selecionadas foram 1, 2, 3, 4, 5, 7 e 8.

Durante a execução das atividades de entrada de dados gráficos, utilizou-se um programa de CAD, para digitalização das cartas básicas. Em seguida, os arquivos gerados no CAD (dxf) foram inseridos no SPRING para a elaboração das cartas básicas e interpretativa.

O terceiro passo foi o modelamento dos dados, sendo esse realizado por meio do SPRING e constou basicamente da elaboração da carta derivada através da técnica AHP (Processo Analítico Hierárquico). Segundo Lopes (2002), esse procedimento baseia-se no princípio de interseção de conjuntos espaciais de mesma ordem de grandeza e está baseado em condicionantes. Para aplicação deste tipo de avaliação, adotaram-se os seguintes procedimentos: ponderação das unidades, elaboração da matriz de correlação, determinação dos pesos das cartas básicas e interpretativa e elaboração do produto final.

A ponderação das unidades (geologia, pedologia, vegetação e declividade) que compõem as cartas básicas e interpretativa selecionadas foi realizada a partir do estabelecimento de pesos em função da contribuição de cada unidade ao processo erosivo. Quanto maior for o peso, maior será a contribuição de cada unidade considerada no desenvolvimento do processo.

Na elaboração da matriz de correlação, foram relacionadas as cartas básicas e interpretativa, duas a duas. Neste procedimento, os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados dois a dois, e um critério de importância é atribuído ao relacionamento entre esses fatores, conforme uma escala pré-definida.

A determinação do peso para as cartas básicas e interpretativa é o resultado obtido a partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores. Foi possível determinar um conjunto ótimo de pesos que foram utilizados para a combinação das cartas básicas (geologia, vegetação e solos) e da carta derivada (declividade).

O produto final da técnica AHP foi obtido após o fatiamento da grade numérica gerada a partir da combinação das cartas básicas e derivada. No fatiamento foram utilizados os intervalos e graus de influência. Como resultado (fatiamento) obteve-se um produto de fácil leitura, uma vez que o mapa de predisposição à erosão elaborado possui uma legenda de cinco tonalidades. Cada um desses tons está associado a um determinado grau de influência do processo erosivo. Quanto mais escura a tonalidade maior é a predisposição à erosão.

O quarto passo foi a edição dos dados, quando as cartas básicas, interpretativa e derivada foram levadas para o módulo SCARTA, que é um gerenciador de cartas que faz interligação com o módulo principal SPRING. Em seguida essas cartas foram salvas em formato JPG. Posteriormente esses arquivos foram importados e editados em um programa de edição gráfica, uma vez que este programa possui uma maior gama de recursos gráficos. Este procedimento possibilitou a elaboração de produtos com uma qualidade gráfica muito boa.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Cartas básicas**

- Mapa geológico

O mapa geológico teve como base o mapa de geologia elaborado pela CPRM (2003). A etapa de preparação dos arquivos digitalizados foi realizada dentro de um programa de CADD, ocasião na qual foram criados arquivos auxiliares (dxf) nos quais contendo apenas as unidades a

ser tratada no SPRING, as classes geológica. Os arquivos no qual foram digitalizadas essas classes contêm apenas um tipo de entidade, as linhas.

A primeira atividade realizada dentro do SPRING foi a criação dos arquivos vetoriais. Inicialmente importamos os arquivos dxf (unidade geológicas), em seguida foi utilizado o menu (edição topológica) do SPRING para editar as linhas, ajustar as extremidades e poligonalizar as classes.

Após a edição de vetores, os polígonos foram associados a uma classe temática do banco de dados para que possuam características de apresentação, como cor e preenchimento, de acordo com os padrões anteriores definidos. Nesta etapa, cada polígono foi classificado em uma unidade geológica, e como tal foi representada pela cor definida a essas classes respectiva no Banco de Dados. Em seguida, o mapa geológico foi então convertido em um arquivo matricial para posterior cruzamento com os outros fatores.

- Mapa fitológico

O mapa fitológico teve como base o mapa de vegetação elaborado pelo IPECE (2000). A etapa de preparação dos arquivos digitalizados também foi realizada dentro de um programa de CADD, gerando arquivos auxiliares (dxf) correspondente às classes fitológicas.

Os arquivos referentes a essas classes também contêm apenas um tipo de entidade: as linhas. Os demais passos para elaboração do mapa fitológico foram os mesmos do mapa geológico.

- Mapa pedológico

O mapa de solo teve como base o mapa pedológico elaborado pelo IPECE (1997). Assim como os mapas geológico e fitológico, a etapa de preparação dos arquivos digitalizados também foi realizada mediante o uso de um programa de CADD, por meio do qual foram criados arquivos auxiliares (dxf) relativo às classes pedológicas. Os arquivos no qual foram digitalizadas essas classes contêm apenas um tipo de entidade: as linhas.

No SPRING foram criados os arquivos vetoriais. Inicialmente foram importados os arquivos dxf (unidade pedológica). E em seguida foi utilizado o menu (edição topológica) do SPRING para editar as linhas, ajustar as extremidades e poligonalizar as classes. Após a edição de vetores, os polígonos foram associados a uma classe temática, para que possuíssem características de apresentação, como cor e preenchimento, de acordo com os padrões definidos. Nesta etapa, cada polígono passou a ser uma unidade pedológica, e como tal foi representada pela cor definida para essas classe no banco de dados. Em seguida o mapa pedológico foi então convertido em arquivo matricial, para posterior cruzamento com os outros fatores.

## 4.2 Carta de declividade

O mapa de declividade da microbacia do rio Aracatiaçu foi gerado em duas etapas. A primeira etapa foi a aquisição das amostras altimétricas na forma de curvas de isovalores e pontos tridimensionais. Para isso, usamos as cartas de Itapipoca, Sobral, Irauçuba, Santa Quitéria e Tapeuba. As cartas citadas foram inseridas em um programa de CADD e em seguida digitalizadas as curvas e pontos, que foram importados para o banco de dados do SPRING.

Na segunda etapa, as amostras foram processadas de forma a criar uma grade triangular irregular TIN (resolução de 5m), aplicando o método de triangulação Delaunay, implementado no SPRING. Considerando os pontos cotados e as curvas de nível, foram geradas superfícies triangulares, iniciando no ponto culminante do terreno até atingir uma linha de quebra (linha de drenagem). Segundo INPE (2002), essa modelagem considera as arestas dos triângulos, o que permite que as informações morfológicas importantes, como as descontinuidades representadas por feições lineares do relevo (cristas) e drenagem (vales) sejam consideradas durante a geração da grade.

Assim, a superfície do terreno pôde ser modelada preservando as feições geomorfológicas da área. Os valores de saída dessa grade foram gerados em porcentagem, com uma resolução de 30m. Em seguida foi feito o fatiamento da mesma com o intuito de se obter um mapa temático

para representar os intervalos de declive. A associação das classes temáticas da categoria de saída com aquelas geradas pelo fatiamento da grade de declividade permite que o mapa temático resultante possua características de apresentação, como cor e preenchimento, de acordo com os padrões definidos quando criada a categoria declividade no banco de dados. O modelo gerado para representar o padrão altimétrico da microbacia do rio Aracatiaçu mostrou que a declividade nessa área varia de 0-27%.

### 4.3 Carta derivada

Segundo Guerra (1998), o mapa de predisposição à erosão reflete a tendência para a instalação de processos erosivos, não condicionando as variáveis ao progresso do processo e ao tipo final da feição a ser desenvolvida. Visa identificar as áreas mais predispostas ao aparecimento de feições erosivas. Na elaboração do referido mapa foram considerados os seguintes componentes do meio físico: geologia, vegetação, solos e declividade.

O mapa de predisposição foi gerado no SPRING, utilizando a técnica AHP (Processo Analítico Hierárquico); por meio desta técnica foi realizada a ponderação (determinação de pesos) das unidades das cartas básicas e interpretativas, a partir da análise de alguns atributos físicos, como litologia, grau de alteração, característica da cobertura vegetal etc. Segundo Guerra (1998), essa ponderação é subjetiva e reflete um determinado nível de conhecimento dos processos erosivos. Esse autor ainda ressalta que as unidades devem ser ponderadas somente em função das características básicas do tema, ou seja, se estamos analisando uma unidade fitológica, deve-se considerar apenas a cobertura vegetal, e não o tipo de relevo ao qual está associada.

- Ponderação das unidades de declive

Para ponderar as unidades de declive da microbacia do rio Aracatiaçu, considerou-se que quanto maior fosse a inclinação do terreno, maior seria sua influência no processo erosivo, uma vez que declives mais acentuados favorecem a concentração e maiores velocidades de escoamento das águas, aumentando desta forma sua capacidade erosiva. Já nos terrenos planos ou levemente inclinados, a água escoar com pequena velocidade e possui menos energia, tendo mais tempo para infiltrar-se.

A primeira classe (0-2%) recebeu peso 0,2 (contribuição muito baixa). Essa área corresponde a terrenos planos ou quase planos das unidades de planície aluvial, terraço fluvial e planície litorânea.

A segunda classe (2-5%) recebeu peso 0,4 (contribuição baixa), corresponde às áreas de ondulação suave dos fundos de vales e superfícies tabulares.

A terceira classe (5-10%) recebeu peso 0,6 (contribuição moderada), e a quarta classe (10-15%) recebeu peso 0,8 (contribuição alta). Ambas possuem declividade média e correspondem aos Maciços Residuais Secos.

A quinta classe (15-27%) recebeu peso 1 (contribuição muito alta). Possui declividade alta e também corresponde aos Maciços Residuais Secos. Nesse tipo de declive, a resistência ao escoamento das águas é menor, e por isso elas atingem maiores velocidades, acentuando o processo de erosão hídrica.

A ponderação foi realizada por meio da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algebrico (Programa em LEGAL). Inicialmente, foram definidos o plano de informação e a tabela de ponderação, com os pesos associados a cada classe de declive. Em seguida, o mapa de declividade (temático) é recuperado através da função RECUPERE, e o plano de informação de saída é criado através do operador NOVO. O novo plano foi criado como uma grade regular de resolução de 30 metros, na escala de 1:100.000 e valores máximos 1 e mínimos 0,2.

- Ponderação das unidades pedológicas

Para ponderar as unidades pedológicas, levou-se em consideração a textura dos solos cartografados. Resende, apud GOMES (1998), salienta que, de modo geral, os solos arenosos são mais suscetíveis à erosão que os solos argilosos, pois as partículas finas de areia possuem menor

poder agregante e são mais facilmente arrastadas pela água da enxurrada. O solo podzólico vermelho amarelo eutrófico e distrófico está distribuído pela unidade geoambiental do Tabuleiro. Este tipo de solo é derivado de sedimentos areno-argilosos da Formação Barreira e de produtos de alteração de vários tipos de rochas cristalinas (PEREIRA; SILVA, 2005). A relação desse tipo de solo com o processo erosivo se deve à diferença textural entre um horizonte arenoso e um horizonte subsuperficial mais argiloso. Essa diferença textural representa um obstáculo à infiltração da água, diminuindo a permeabilidade e favorecendo o escoamento superficial e subsuperficial na zona de contato entre os horizontes (GUERRA; BOTELHO, 2003). Essa classe de solo recebeu peso 0,2 (contribuição muito baixa) devido à sua textura argilosa.

O solo bruno não-cálcico está distribuído pelas unidades geoambientais da Depressão Sertaneja e nos Maciços Residuais Secos. Estes solos se desenvolvem a partir de rochas do tipo gnaisses e migmatitos (PEREIRA; SILVA, 2005). A pré-disposição desse tipo de solo à erosão está relacionada à coesão e consistência dura do horizonte A e ao forte gradiente textural entre os horizontes A e B (GUERRA; BOTELHO, 2003). Esta classe de solo recebeu peso 0,4 (contribuição baixa), por sua textura arenosa ou média no horizonte A e argilosa e média no horizonte B.

O regossolo eutrófico e distrófico abrange a unidade geoambiental dos Maciços Residuais Secos. Esse tipo de solo tem na sua formação produtos de alteração de granitos, arenitos, gnaisses e migmatitos (PEREIRA; SILVA, 2005). Trata-se de solos arenosos; portanto quando se encontram em áreas de maior declive têm uma maior pré-disposição à erosão (GUERRA; BOTELHO, 2003). Esta classe de solo teve peso 0,6 (contribuição moderada), uma vez que compreende solos com textura muito arenosa.

O planossolo solódico está distribuído na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja e nos Maciços Residuais Secos. Este tipo de solo possui em sua formação materiais provenientes da alteração de granitos, arenitos, gnaisses e migmatitos. (PEREIRA; SILVA, 2005). A predisposição dessa classe de solo à erosão está relacionada à transição abrupta entre os horizontes em função do contraste textural. O peso atribuído a essa classe de solo foi 0,8 (contribuição alta), devido à sua textura arenosa no horizonte A, sobre um horizonte B altamente argiloso.

As areias quartzosas distróficas e marinhas estão localizadas na Unidade Geoambiental do Litoral, originadas a partir de sedimentos arenosos do Grupo Barreiras, arenitos do Cretáceo e Siluriano-Devoniano, ou ainda por sedimentos arenosos não consolidados (dunas) (PEREIRA; SILVA, 2005). O maior problema dessa classe em relação ao processo erosivo está relacionado à escassez de materiais agregadores, como a argila e a matéria orgânica. A partir dessa análise, as areias quartzosas distróficas e marinhas receberam peso 1 (contribuição muito alta).

O solonchak está distribuído em relevo plano, próximo à desembocadura do rio Aracatiçu e pela partes baixas da orla marítima, sob influência da maré. Este tipo de solo é formado por sedimentos muito finos, de deposição quaternária e encontra-se em áreas alagadas. Essa classe de solo recebeu peso 1 (contribuição muito alta), uma vez que são originados por deposição fluvial recente e sob condições de excesso de água do mar.

Assim como a declividade, a ponderação das unidades pedológicas foi realizada via linguagem LEGAL, seguindo os mesmos passos.

- Ponderação das unidades fitológicas

A ponderação das unidades fitológicas foi realizada considerando-se a densidade da cobertura vegetal. Quanto mais densa for a vegetação, maior o poder de interceptação da chuva e, conseqüentemente, menor a erosão.

No complexo vegetacional da zona litorânea temos uma diversidade de espécies que vão do porte arbóreo, passando pela arbustiva, até a herbácea. A vegetação arbórea possui copas bem desenvolvidas, o que facilita a interceptação das gotas da chuva; a vegetação arbustiva tem uma cobertura vegetal ora densa, ora aberta, que associada à vegetação arbórea e herbácea propicia uma proteção maior do terreno em relação ao impacto das gotas da chuva. A interceptação das gotas da chuva tem um papel fundamental para evitar o desenvolvimento do processo erosivo acelerado, uma vez que é a partir do impacto das gotas da chuva no terreno desprotegido que o

processo erosivo tem seu início. A partir dessa análise, o complexo vegetacional da zona litorânea recebeu peso 0,2 (contribuição muito baixa).

A vegetação de mangue está localizada no estuário do rio Aracatiaçu e expande-se para o interior da planície fluvial até onde se faça presente a influência marinha pelo fluxo e refluxo da maré. O manguezal constitui uma formação florestal perenifólia, com espécies altamente adaptadas ao ambiente flúvio-marinho. Forma um ambiente florestal de porte arbóreo, com muitos indivíduos, porém com baixa diversidade de espécies vegetais. Pereira e Silva (2005) comentam que esse tipo de vegetação funciona como uma eficiente proteção das margens da desembocadura dos rios, diminuindo a erosão, e retrai o avanço das dunas. Esta unidade fitológica recebeu peso 0,4 (contribuição baixa).

A mata ciliar é uma formação florestal típica de áreas restritas ao longo do curso de água. Na área em estudo encontramos uma forte presença da vegetação de carnaúba, o que a levou a receber um peso 0,6 (contribuição moderada).

A caatinga arbustiva é composta, segundo Sá (2002), por dois estratos: um com indivíduos de 3 a 5 metros de altura, havendo raros exemplares arbóreos, e outro baixo, herbáceo. Esse tipo vegetacional não propicia grande cobertura ao terreno, já que geralmente é uma vegetação espaçada, deixando o terreno desprotegido. Desta forma, a caatinga arbustiva fechada teve peso 0,8 (contribuição alta) e a caatinga arbustiva aberta teve peso 1 (contribuição muito alta).

Assim como as unidades de declividade e as unidades pedológicas, a ponderação das unidades fitológicas foi realizada via linguagem LEGAL, seguindo os mesmos passos.

- Ponderação das unidades geológicas

Antes de fazer a ponderação das unidades geológicas da microbacia do rio Aracatiaçu, foi feita a reclassificação dessas unidades. Este procedimento foi realizado para reduzir o número de classes, utilizando como critério a semelhança entre os tipos litológicos.

No processo de reclassificação, o Grupo Barreira e o depósito aluvial não sofreram nenhum tipo de associação, porém em vez de usar o nome Grupo Barreira, optamos por Sedimentar 2, e o depósito aluvial permaneceu com o mesmo nome. Os depósitos eólicos litorâneos (1 e 2) foram associados em virtude de sua composição semelhante (areia de granulação fina), recebendo o nome de Sedimentar 1.

As unidades Canindé e Independência do Complexo Ceará foram agrupadas, recebendo o nome de Cristalino 1. Os materiais mais consolidados, conseqüentemente mais resistentes, como os granitóides, gnaisses e quartzitos, entre outros, foram agrupados em uma nova classe, que recebeu o nome de Cristalino 2.

A reclassificação das unidades geológicas também foi realizada utilizando um programa em LEGAL. Inicialmente foi criada uma tabela de reclassificação com os agrupamentos anteriormente definidos. Em seguida foi recuperada a variável do tipo temática (mapa geológico), criando um PI de saída do tipo temático, com resolução de 30m e escala 1:100.000. A operação de reclassificação foi executada sobre o mapa geológico.

A ponderação das unidades geológicas foi realizada a partir da análise do tipo litológico e de sua suscetibilidade. Lepsch (2002) menciona que a litologia, mesmo exercendo um papel passivo à ação climática e orgânica, influencia no tipo de solo (material mineral), como também nas suas características intrínsecas (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, cor, granulometria, etc.). Assim, solos de textura arenosa, que normalmente apresentam alta predisposição à erosão, associam-se em geral a formações areníticas ou rochas cristalinas quartzosas e a sedimentos de origem alúvio-colvionar de meia encosta.

A unidade geológica Cristalino 2 está localizada principalmente na porção sul da microbacia do rio Aracatiaçu. Esta unidade geológica recebeu peso 0,2 (contribuição muito baixa), uma vez que a mesma é formada por rochas bem consolidadas e sem regolito, aumentando assim a sua resistência à erosão.

A unidade geológica Cristalino 1 está localizada na parte oeste da microbacia em questão. Essa unidade recebeu peso 0,4 (contribuição baixa), uma vez que a mesma é composta por ro-

chas metamórficas (porosas e com clivagem e foliação), intemperizadas e com a presença do regolito o que diminui sua resistência ao processo erosivo.

A unidade geológica Sedimentar 2, localizada na porção nordeste da microbacia do rio Aracatiaçu, recebeu peso 0,6 (contribuição moderada), uma vez que é formada por rochas de origem sedimentar consolidadas. São mais resistentes à erosão do que as rochas sedimentares inconsolidadas.

A unidade geológica Sedimentar 1 recebeu peso 1 (contribuição muito alta) e os depósitos aluviais receberam peso 0,8 (contribuição alta); ambas as unidades são formadas por material inconsolidado, o que facilita o desenvolvimento do processo erosivo, uma vez que este material pode ser facilmente transportado. Os depósitos aluviais receberam peso menor em relação à unidade geológica Sedimentar 1 porque na sua constituição também há presença de argila, e esta tem uma elevada capacidade de retenção de água.

Assim como a demais unidades consideradas na elaboração do mapa de predisposição à erosão, a ponderação da unidade geológica foi realizada utilizando um programa em LEGAL, seguindo os mesmos passos das demais.

#### 4.4 Matriz de correlação

Uma das grandes dificuldades no processo de integração de planos de informação em ambiente SIG é a determinação do peso das variáveis e do método de combinação dos dados. Câmara et al. (2001) comentam que, para estes casos, é muito útil dispor de ferramentas que auxiliem na tomada de decisão, ajudando a organizar e estabelecer um modelo racional de combinação de dados. Uma das alternativas mais promissoras de suporte à decisão é o processo analítico hierárquico (AHP). Esta teoria, com base matemática, permite organizar e avaliar a importância relativa entre os critérios e medir a consistência dos julgamentos.

Para elaborar a matriz de correlação, os diferentes fatores que foram utilizados nesta avaliação são comparados dois a dois, e um critério de importância relativa foi atribuído ao relacionamento entre eles, como pode ser observado na Tabela 1. O procedimento tem início com a seleção do suporte a decisão/AHP no menu de análise do SPRING, seguido pela comparação pareada. Em seguida, o módulo de análise espacial calcula automaticamente os autovalores da matriz de pesos, os quais correspondem aos ponderadores das variáveis, e a razão de consistência, que é um parâmetro que indica a coerência nas relações.

Tabela 1 - Matriz de valores para comparação pareada

Critério	Peso	Critério
Declividade	5 (melhor)	Solo
Declividade	3 (algo melhor)	Vegetação
Declividade	5 (melhor)	Geologia
Vegetação	3 (algo melhor)	Solo
Solo	1 (igual)	Geologia
Vegetação	4 (moderadamente melhor)	Geologia

A partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores (Tabela 1), foi possível determinar um conjunto ótimo de pesos que foram utilizados para a combinação dos diferentes mapas. É interessante destacar que o sistema fornece indicação de consistência do julgamento feito pelo usuário através do índice de consistência. Segundo os especialistas em AHP, é aconselhável que esse índice seja menor que 0,1. A Tabela 2 mostra os pesos atribuídos às variáveis que foram utilizadas na elaboração do mapa de predisposição à erosão da microbacia do rio Aracatiaçu e a taxa de consistência.

Tabela 2 - Pesos atribuídos às variáveis usadas na elaboração do mapa de predisposição à erosão da microbacia do rio Aracatiaçu.

Atributos	Autovalores
Geologia	0,103
Declividade	0,594
Fitologia	0,208
Pedologia	0,095
Taxa de consistência	0,027

Como resultado, esta função do SPRING gera um “esqueleto” de um programa em LEGAL. Esse programa foi completado com as informações específicas sobre as cartas básicas e derivada. Em seguida foi criado um PI (numérico) de saída com resolução de 30m, escala de 1:100.000 e valores mínimo 0 e máximo 1. A grade gerada apresentou valores que variam de 0,2 a 1.

#### 4.5 Mapa de predisposição à erosão

Para elaboração do produto final foi feito o fatiamento da grade gerada durante o procedimento de elaboração da matriz de correlação. A Tabela 3 mostra o intervalo das classes de fatiamento que foram utilizadas.

Tabela 3 Classes usadas no fatiamento do PI de predisposição à erosão

Classes	Predisposição à Erosão
0.857800 - 1	Muito Alta
0.703750 - 0.857800	Alta
0.549700 - 0.703750	Moderada
0.395650 - 0.549700	Baixa
0.241600 - 0.395650	Muito baixa

O produto do fatiamento foi um mapa temático com cinco classes de predisposição à erosão (Figura 2).

A classe de baixa predisposição está distribuída por todas as partes da microbacia do rio Aracatiaçu, correspondendo à classe de maior expressão em área. É representada por área de Depressão Sertaneja, com altitude inferior a 400m e uma vasta superfície de aplainamento, e pela Planície Litorânea, com superfície relativamente plana e baixa. Na Depressão Sertaneja, além das baixas declividades, as litologias resistentes compensaram os valores mais baixos atribuídos à vegetação do tipo caatinga arbustiva aberta e os solos com alta erodibilidade, possibilitando que essas áreas fossem enquadradas na classe de baixa predisposição. Na Planície Litorânea, a maior influência para a baixa predisposição ao processo erosivo foi a declividade quase nula e a presença do complexo vegetacional da zona litorânea, com vegetação de porte arbóreo, arbustivo e herbáceo.

A classe de menor frequência é a de predisposição muito alta, que está localizada no extremo norte da microbacia, onde ficam as dunas móveis. Nesta faixa, a unidade é sustentada pela frágil cobertura arenosa quaternária, na qual os processos naturais geram solos arenosos e que



co vermelho amarelo, de textura que varia de média a argilosa. Esses fatores propiciaram uma predisposição muito baixa à erosão. No caso do Tabuleiro Pré-Litorâneo, além das baixas declividades e solos resistentes à erosão, o substrato está bem protegido pelo complexo vegetacional da zona litorânea, com a presença de vegetação de porte arbóreo, arbustivo e herbáceo, favorecendo a predisposição muito baixa. É interessante ressaltar que a alteração ou a retirada deste tipo de cobertura do solo poderia ocasionar mudanças na morfodinâmica, tornando a paisagem mais vulnerável.

As áreas com predisposição moderada e alta estão distribuídas pelos Maciços Residuais Secos, que estão localizados na parte leste e sul da microbacia. São áreas constituídas predominantemente por relevos movimentados, associados a solos erodíveis, como o regossolo eutrófico e distrófico, de textura arenosa, e o bruno não-cálcico, de textura arenosa no horizonte A e argilosa no horizonte B. Nesta classe de alta predisposição, apesar de apresentar uma litologia resistente, pesaram as altas declividades, os solos altamente erodíveis e a vegetação de caatinga arbustiva aberta, que não fornecem grande proteção ao terreno contra o impacto das gotas de chuva.

## 5 CONCLUSÃO

Os valores de predisposição à erosão encontrados não devem ser tomados como absolutos. Um exemplo são as dunas e os maciços residuais. Para as áreas dos maciços residuais, onde a predisposição à erosão é alta, deve-se considerar que há uma menor disponibilidade de material inconsolidado e, conseqüentemente, a erosão não deverá ser muito acentuada. Nas dunas móveis, onde a predisposição à erosão também foi considerada muito alta, o escoamento superficial é atenuado pela capacidade de infiltração do solo.

As áreas de predisposição muito alta são áreas bastante problemáticas para qualquer tipo de ocupação, ou seja, não devem ser ocupadas e se já destituídas de vegetação natural, devem ser ocupadas apenas para o reflorestamento.

As áreas de predisposição à erosão moderada facultam a utilização agrícola com culturas anuais, semi-perenes e perenes, porém exigem a adoção de técnicas conservacionistas complexas, ou seja, a necessidade de combinar práticas de caráter vegetativo e de caráter mecânico. As áreas de predisposição à erosão muito baixa e baixa possibilitam qualquer tipo de exploração agrícola com a utilização de práticas simples de conservação de solo, como as de caráter vegetativo ou edáfico.

A predisposição à erosão deve ser considerada como uma aproximação que facilite o entendimento dos processos erosivos e discipline as intervenções, principalmente nas áreas que são mais suscetíveis.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CÂMARA, G. et al. Técnicas de inferência geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. (Ed.) **Introdução à ciência da geoinformação**. 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap9-inferencia.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2006.

CPRM. **Mapa geológico do Estado do Ceará**. 1 mapa. Escala 1:500.000. Acompanha uma legenda expandida. 2003.

GOMES, M de F. dos S. **A apropriação dos recursos da natureza e o processo erosivo no oeste do Paraná: O caso da bacia do Cascavel**. 1998. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociência e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

GUERRA, A. T.; BOTELHO, R.G.M. Erosão dos solos. In: CUNHA, S.B.; GUERRA A.J.T. (Orgs.). **Geomorfologia do Brasil**. 3. ed., São Paulo: Bertrand Brasil, 2003. p. 181-227.

GUERRA, S. M. S. **Cartografia geológico-geotécnica de áreas costeiras: o exemplo de Sua-pe-PE**. Rio Claro, 1998. 176f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

LOPES, Eymar Silva Sampaio. **Tutorial 10 aulas – SPRING-3.6**. INPE, 2002.

BEZERRA, E. C.; BEZERRA, J. E. G.; MENDES, M. F. Precipitações. In: **Atlas do Ceará**. Fortaleza: IPLNCE, 1997.

IPECE (2000). **Mapa das regiões hidrográficas do Ceará**. Escala 1:100.000.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Texto, 2002.

PEREIRA, R, C, M.; SILVA, E.V. de. Solo e vegetação do Ceará: características gerais. In: BORZACCHIELLO, J.; CAVALCANTE, T.; DANTAS, E. (Orgs.). **Ceará: um novo olhar geográfico**. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2005, p.189-210.

SÁ, I.M. de B. Agricultura e biodiversidade. In: ELIAS, D.; SAMPAIO, J.L.F. (Orgs.). **Modernização excludente**. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2002. p. 61-81.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. São Carlos, 1993. 368f. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.