

AValiação DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO POTENGI, RN.

Rodrigo de Oliveira Santos ¹ & Ada Cristina Scudelari ²

RESUMO --- Este trabalho pretende avaliar qualitativamente a suscetibilidade à erosão hídrica ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Potengi (BHRP), de maneira que possa facilitar o direcionamento de investimentos para áreas consideradas prioritárias, bem como respaldar o planejamento de ações voltadas para o manejo e o monitoramento de uma bacia hidrográfica. O mapa de suscetibilidade à erosão hídrica foi construído a partir da sobreposição da erosividade das chuvas, da erodibilidade dos solos, da declividade do terreno e da cobertura do solo. Para a sobreposição desses critérios foi realizada uma análise multicriterial pelo método AHP (*Analytical Hierarchy Process*). A partir da avaliação do mapa de suscetibilidade à erosão, foi possível constatar que as porções de cabeceira oeste da bacia e do baixo rio Potengi manifestam maior vulnerabilidade aos processos erosivos, enquanto que a região central foi considerada a menos suscetível à erosão. Percebeu-se ainda que nas parcelas mais a oeste da bacia, onde se revelam as nascentes da rede hídrica, a erosão é impulsionada, naturalmente, pelas grandes declividades aliadas aos solos frágeis. Já para a região leste da bacia, sugere-se que a maior parte da perda de solo é consequência das atividades antrópicas, preponderantemente.

ABSTRACT --- This study aims to assess the hydric erosion susceptibility along the Potengi River watershed by a qualitative approach, which may help, in future, to determine investment directions associated with areas regarded as priority, and may also assist to plan actions for watershed management and monitoring. The susceptibility map was developed by overlaying rainfall erosivity, soil erodibility, slope of the terrain and land cover criteria. In order to overlap these maps, a multi-criteria analysis was applied through AHP method. By assessing the wished map here, it was possible to find that the regions in the extreme west of the watershed and in the downstream portions showed greater erosion vulnerability, whereas central areas were less susceptible. It was also noticed that in the west parcels, where one can observe the headwaters, erosion was naturally forced by high declivity and weak soils. In another hand, for the eastern part, it's suggested that most of the soil loss is due mainly to human activities.

Palavras-chave: suscetibilidade à erosão hídrica; bacias hidrográficas, Rio Potengi.

1) Mestre em Engenharia Sanitária pela UFRN. E-mail: roderigo.oliveira@gmail.com

2) PPGES-DEC-UFRN: Campus Universitário - CT - LARHISA, Fone 84.3215-3775, Fax 84.3215-3930, e-mail ada@ct.ufrn.br

1. INTRODUÇÃO

Dentre os rios que deságuam no litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte, destaca-se o Rio Potengi, por conta de sua extensão de mais de 170 Km, atravessando diversos municípios e diferentes configurações de paisagens, e, sobretudo, pela diversidade de atividades que se desenrolam em seu estuário, considerando que às margens de seu estuário está localizado o município de Natal, capital do Estado, com mais de 806.000 habitantes, o que significa cerca de 25% da população total do Rio Grande do Norte (IBGE, 2010).

Sob a ótica econômica, além de seu valor de existência enquanto área que comporta um rico ecossistema, incluindo manguezais, trata-se de uma fonte tradicional de recursos pesqueiros, incluindo práticas de carcinicultura, além de ser um ambiente admirado pela beleza cênica e para o entretenimento. É também nesse estuário onde está instalado, desde 1932, o Porto de Natal, sendo peça importantíssima para a economia da região e para o qual a profundidade do canal é fator determinante para a operação de entrada e saída de navios.

Sabe-se que em função dos estuários estarem, em geral, protegidos das ondas de oscilação, bem como por constituírem os últimos quilômetros de um rio, estabelecem um ambiente de destino propício para a acomodação de sedimentos finos, coesivos, silte e argila (Dyer, 1997).

Conseqüentemente, interferências antrópicas, a exemplo do desenvolvimento de obras hidráulicas inadequadas, da ocupação desordenada do solo e de seu uso indiscriminado para atividades agropecuárias, podem intensificar o aporte de sedimentos nos estuários, culminando em redução de suas profundidades, larguras e declividades do canal, assoreamento, alteração da qualidade das águas e dos ecossistemas.

Essas alterações podem acarretar em prejuízo substancial para as instalações portuárias, impelindo maiores riscos às embarcações que almejam alcançar o Porto de Natal através do estuário do Rio Potengi e suscitando dispendiosas operações de dragagem do seu canal principal. Além dos prejuízos por assoreamento, quando existem porções urbanizadas ou de agricultura no entorno do curso d'água, soma-se um risco associado de que os sedimentos produzidos nessas parcelas possam conferir contaminação ao corpo hídrico.

Partindo do pressuposto de que há interesse público de recuperar e preservar o Rio Potengi, juntamente com seu estuário, impondo destaque, neste caso, para as questões associadas aos processos erosivos; e considerando que, por definição, toda a área de bacia é capaz de contribuir para aporte de sedimentos ao estuário do rio, julga-se conveniente que se realizem avaliações preliminares das condições da bacia hidrográfica do ponto de vista de sua suscetibilidade a sofrer erosão hídrica, o que pode servir de respaldo para o planejamento de ações voltadas para o manejo e o monitoramento de uma bacia hidrográfica, bem como para facilitar o direcionamento de investimentos para áreas consideradas prioritárias.

O mapa de suscetibilidade à erosão hídrica deve representar a distribuição do potencial de um determinado território de sofrer erosão a partir do desenrolar dos processos pós-precipitação. Para tanto, devem ser analisados a natureza do relevo; a cobertura vegetal; os fatores climáticos; a ação antrópica; e ação das águas (Silva *et al.*, 2004).

Diante disso, este trabalho tem o intuito de avaliar qualitativamente a suscetibilidade à erosão hídrica ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Potengi (BHRP) através da sobreposição de critérios naturais e de interferência antrópica, com auxílio de avaliação multicriterial e de ferramentas de geoprocessamento. Espera-se que este trabalho contribua para o entendimento de como e em que grau os padrões de uso e ocupação do solo que se desenvolvem na bacia influenciam os processos erosivos.

2. MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A BHRP está situada no nordeste setentrional brasileiro, especificamente no Estado do Rio Grande do Norte, e apresenta uma área de aproximadamente 4.100 Km², de acordo com dados do IDEMA (2010), sendo a maior bacia dentre as que deságuam no litoral leste do Estado. Em seu estuário ressalta-se a presença do município de Natal, destacado na Figura 1.

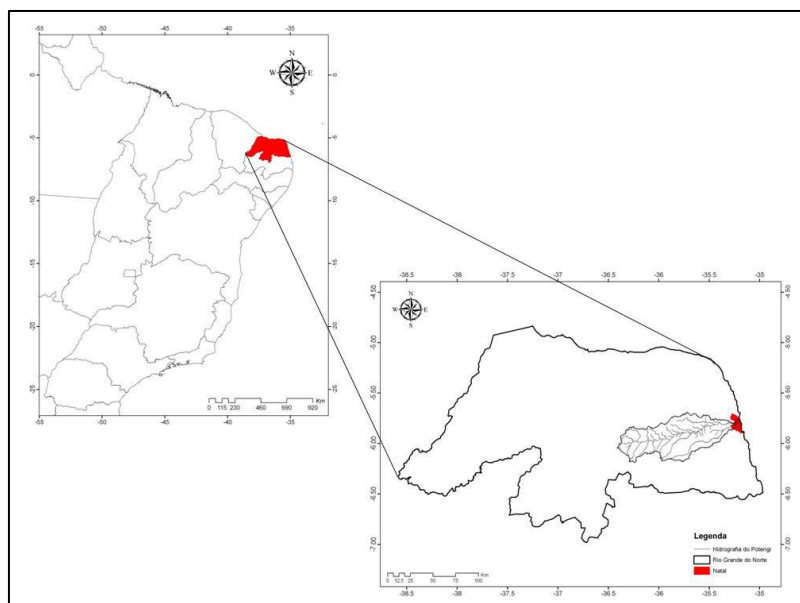


Figura 1 - Localização da BHRP

A composição topográfica da BHRP é diversificada, manifestando-se na forma de relevo plano e suave ondulado no seu baixo curso, e ondulado e forte ondulado no restante da área, revelando também superfícies arrasadas, serras e serrotes elevados, tais como a Serra do Balanço, Serra do Bonfim, Serra da Formiga e Serra do Ingá (Brasil, 1981).

Nessa bacia, a rede de drenagem na apresenta padrões distintos; no baixo curso predominam os padrões paralelos com rios e riachos direcionados para o leste, enquanto que no médio e no alto

Rio Potengi o direcionamento segue o padrão de drenagem dendrítico, sendo fortemente influenciados pelas estruturas geológicas.

A porção oeste da bacia, que é onde se manifestam também as maiores declividades, é composta predominantemente por solos mais frágeis, ou mais suscetíveis à erosão hídrica, sendo solos do tipo Neossolo Litólico e Luvisso Crômico Órtico, segundo a classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 1999), enquanto que os demais solos abrangem a porção central e leste, destacando-se o Argissolo Vermelho-amarelo por ocupar a maior área dentre todos, 33,72% de toda a bacia.

Geomorfologicamente, a BHRP é constituída predominantemente por três unidades principais (Figura 2), a saber: *Tabuleiros costeiros*, ocupando 8% da área; *Depressão Sertaneja*, ocupando 53% da área; e *Planalto da Borborema*, que se manifesta em 34% do território. Além dessas unidades, também se apresentam, em menor escala, a *Planície flúvio-marinha*, na região estuarina do Rio Potengi, a *Planície fluvial*, mais à montante, atravessando os Tabuleiros costeiros, as *Dunas fixas* e as *Áreas urbanizadas*, ocupando todas juntas uma área de 8%. As especificidades ambientais que demarcam as unidades geomorfológicas da BHRP, dentre as quais se destacam o relevo, o clima, o solo e sua cobertura, revelam a possibilidade de utilizar as mesmas unidades como zonas distintas ou subsistemas de avaliação dos processos erosivos, antes da definição das sub-bacias, que é uma divisão moldada a partir das características topográficas e da rede de drenagem.

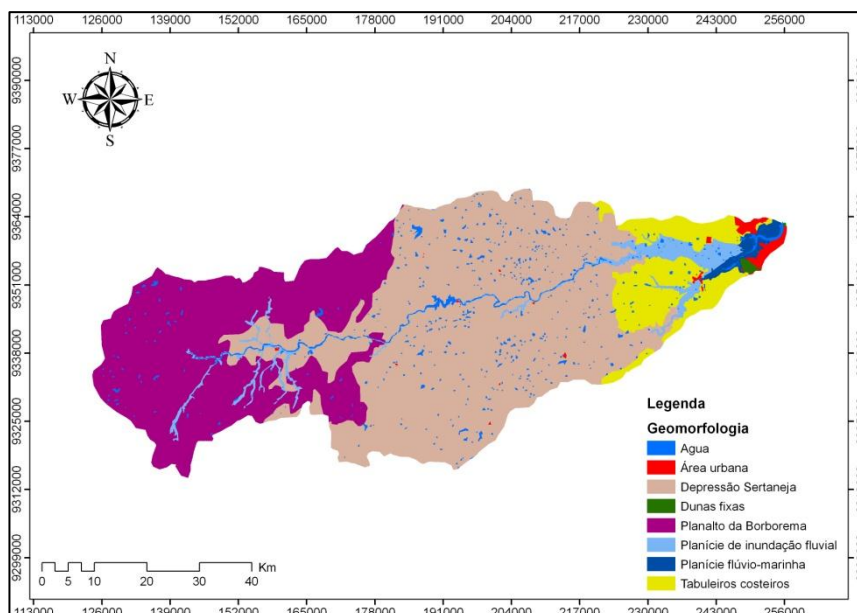


Figura 2 - Unidades geomorfológicas presentes da BHRP.

Os Tabuleiros costeiros são definidos por formas tabulares, com altitudes entre 70 e 100 m, localizadas no baixo curso do Rio Potengi, nas quais se manifestam entalhes fracos de drenagem. Seu relevo se impõe principalmente de forma plana e suave-ondulada, favorecendo, assim, a ação dos processos de escoamento superficial difuso, a erosão tipo laminar e a infiltração das águas e de material de granulometria fina. Dessa maneira, em geral, estas áreas são, naturalmente, de baixa

predisposição à erosão. Entretanto, a ocupação humana, na forma de atividades agrícolas, tem incrementado sua suscetibilidade aos processos erosivos.

A Depressão Sertaneja se localiza na parte central da BHRP, e representa cerca de 50% da área total da bacia. Trata-se de uma área dissecada, constituída de pequenos interflúvios tabulares, limitando-se ao leste pelos Tabuleiros Costeiros, de forma gradual e sem rupturas topográficas perceptíveis, e a oeste com a unidade Planalto da Borborema, contato, este, caracterizado por uma acentuada discrepância altimétrica.

No Planalto da Borborema, unidade de maiores altitudes presente na BHRP, ocupando aproximadamente 30% da bacia, prevalece a litologia Pré-Cambriana do Complexo Cristalino, com aparições de pequenas manchas sedimentares. Essa unidade compõe o extremo oeste da BHRP, e em seu bordo se situa a cabeceira do Rio Potengi, a partir da qual segue na forma de cursos rápidos e de corredeiras até atingir as áreas baixas da Depressão Sertaneja, sendo, de tal modo, fonte para o fornecimento do material de espriamento.

Pela classificação climática de Köppen, o clima da região, assim como em todo o Estado do Rio Grande do Norte, é predominantemente semi-árido muito quente, sendo que no extremo oeste, compondo 10% de toda a bacia, prevalece o semi-árido do tipo BSw'h' e na porção central da bacia, contemplando a unidade geomorfológica da Depressão Sertaneja, predomina o tipo BSs'h'. Apenas na região litorânea, parcela leste da BHRP, onde se localiza o estuário, predomina o clima quente e úmido do tipo As'. As temperaturas em todo o Estado apresentam uma considerável homogeneidade espacial, com variação pouco significativa, considerando que suas isotermas médias oscilam entre 24° e 27°C. Já as precipitações, ao contrário do que ocorre com a temperatura, apresentam uma grande variação, decrescendo do litoral, Tabuleiros Costeiros, em direção ao Planalto da Borborema. Segundo a SERHID (1998), os dados de chuvas anuais médias oriundos de séries histórias de longo período apontam para um decréscimo em seus valores partindo do litoral em direção ao interior, variando de aproximadamente 1.300 mm na foz até 500 mm nas cabeceiras.

Como consequência do clima semi-árido e da sua escassez de chuvas associada, a maior parte da rede hídrica se apresenta seca durante o maior período do ano. Como exceção, a região de baixo curso do rio apresenta trechos perenizados devido às ações das marés de seu estuário, assim como pelo maior volume de chuvas. Em épocas de enchentes, quando há escoamento associado a eventos chuvosos de regime hidráulico relativamente forte, são mobilizadas grandes quantidades de detritos arenosos, depositados posteriormente ao longo do curso d'água principal, formando lençóis aluviais sucessivos de idades diferentes. Estes lençóis entalhados pelo rio deram origem aos atuais terraços (Lima, 1980). Por conseguinte, a maior parte da erosão, transporte e deposição de sedimentos que se desenrola na BHRP está intimamente relacionada com enchentes periódicas e eventos chuvosos individuais.

Dentre os tipos de vegetação encontrados na BHRP, a Caatinga é, de longe, a mais expressiva, chegando a ocupar cerca de 80% do território da bacia. Trata-se de um bioma intimamente associado ao clima semi-árido e que se apresenta através de árvores e arvoretas de porte relativamente pequeno, distribuídas esparsamente em conjunto com plantas suculentas e com um estrato arbustivo e herbáceo estacional. Todavia, a Caatinga vem sofrendo o impacto das forças antrópicas, de maneira que sua supressão tem sido crescente, seja em prol do desenvolvimento de cultivos ou da pecuária, seja para o uso de seu material lenhoso enquanto biomassa energética, alimentando fornos residenciais, de cerâmicas e de outros empreendimentos. Além da Caatinga, manifestam-se, sobretudo no leste da bacia, pequenos fragmentos de floresta estacional semidecidual, vegetações antropizadas ou em regeneração, áreas ocupadas por agricultura e pastagem e mangues.

2.2. Desenvolvimento dos mapas de base

No presente trabalho, a suscetibilidade à erosão hídrica na BHRP foi avaliada qualitativamente através da sobreposição de critérios naturais e de interferência antrópica. Para tanto, cada critério foi estimado e classificado, por meio de ferramentas de SIG, segundo sua capacidade de contribuir para com os processos erosivos capazes de provocar perda de solo e produção de sedimentos.

Entre os critérios naturais foram avaliados a *erosividade*, impondo-se enquanto fator de agressividade climática; a *erodibilidade* dos solos, que está relacionada com a resistência dos solos aos processos erosivos, considerando suas propriedades granulométricas e hídricas; e a distribuição das *declividades*, sendo uma derivação da natureza do relevo. Além desses, a fim de considerar a cobertura vegetal e a interferência das atividades humanas, avaliou-se o critério de *cobertura do solo*.

Para cada um dos critérios envolvidos, a avaliação foi realizada com o objetivo de atribuir *índices de sensibilidade*, que variaram de 1 a 5, de acordo com o grau de contribuição para os processos erosivos ao longo da área da BHRP, de maneira que recebeu o índice 1 aquela área na qual o critério implicava em menor predisposição à erosão, e índice 5 aquela na qual o critério estava associado a maior predisposição (Setegn *et al.*, 2009).

A sobreposição desses critérios foi realizada através de álgebra de mapas seguindo orientações de análise multicriterial, representada neste trabalho pelo método *Analytical Hierarchy Process* (AHP), proposto por Saaty (Saaty, 2006). Na realidade, o método AHP serviu de respaldo para atribuição de ponderações de importância a cada critério, partindo da premissa de que os mesmos contribuem com relevâncias hierarquicamente diferentes no que diz respeito aos processos erosivos.

Diante desses princípios, a seguir estão dispostas, em maiores detalhes, as explicações acerca da construção do mapa de suscetibilidade, passando pelo desenvolvimento de seus mapas-base, sendo eles erosividade, erodibilidade, declividades e cobertura do solo, bem como pela estruturação da álgebra de sobreposição dos mesmos.

2.2.1. Mapa de Erosividade

O processo de erosão hídrica parte do momento e do ponto em que as gotas de chuva golpeiam o solo, podendo interferir em sua conformação anterior em três etapas: a) desprendimento das partículas do solo no local em que sofre o impacto; b) transporte das partículas desprendidas por salpicamento; c) adição de energia à água superficial, sendo determinante para a geração do deflúvio, veículo que impulsiona o transporte das partículas para áreas mais baixas ou mesmo para as calhas de rios.

Dessa forma, considerando constante o tipo de solo, de relevo e de cobertura, as características da chuva por si só constituem uma variável interveniente no processo erosivo, sendo nesse contexto que se aplica o termo *erosividade* ou *agressividade climática*.

O fator erosividade da chuva, R , representa o índice de erosão provocada pela ação da chuva, em $tm \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ ou em $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$; trata-se de um fator numérico que representa a capacidade que uma determinada condição pluviométrica tem de causar erosão em uma determinada área desprotegida, considerando constantes outros critérios intervenientes (Silva *et al.*, 2004).

Para o cálculo da erosividade média mensal, foi usada uma adaptação do coeficiente de Fournier, a Equação 1, proposta por Silva (2004), que abrange a maior porção do nordeste brasileiro, incluindo a BHRP. Já a Equação 2 retorna a erosividade média anual através de um simples somatório das erosividade mensais previamente calculadas,

$$R_x = 42,307 \left(\frac{M_x^2}{P} \right) + 69,763 \quad (1)$$

$$R = \sum_{x=1}^{12} \left[42,307 \left(\frac{M_x^2}{P} \right) + 69,763 \right] \quad (2)$$

Considerando que x é o mês do ano, variando de 1 a 12, C_c é o coeficiente de Fournier para o mês x , M_x é a precipitação mensal (mm) para o mês x , e P é a precipitação anual (mm).

As equações 1 e 2 foram, então, aplicadas aos dados registrados de 16 estações pluviométricas localizadas dentro ou nas proximidades da BHRP. Os dados oriundos de 15 dessas estações foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), com 45 anos de registros diários correspondentes ao período de 1963 a 2007; apenas os dados da estação

localizada em Natal, foram disponibilizados pela estação localizada no campus da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), com 12 anos de registros diários (1995 a 2007).

De posse dos dados de erosividade para cada estação pluviométrica, e com vista à construção do seu mapa de distribuição, considerando a classificação de suas intensidades, foi tomado como referência o trabalho de Foster *et al.* (1981), no qual organizou os valores de erosividade em cinco classes, expostas pela Tabela 1.

Essa classificação foi associada a *índices de sensibilidade* de acordo com a relação de cada classe com os processos erosivos, de forma que o índice 1 foi vinculado a erosividades classificadas como *muito baixas*, ou que contribuem em menor grau para a erosão do solo, enquanto que, por outro lado, o índice 5 foi vinculado a erosividades classificadas como *muito fortes*.

Tabela 1 – Classificação dos valores de erosividade

EROSIVIDADE ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$)	CLASSIFICAÇÃO	ÍNDICE DE SENSIBILIDADE
$R \leq 2452$	Muito baixa	1
$2452 < R \leq 4905$	Baixa	2
$4905 < R \leq 7357$	Média	3
$7357 < R \leq 9810$	Forte	4
$R > 9810$	Muito forte	5

Fonte: adaptada de Foster *et al.* (1981).

A fim de regionalizar os resultados pontuais de cada estação para que representassem áreas da bacia, foram construídos polígonos de Thiessen. Assim, com a atribuição dos valores de erosividade média anual aos polígonos associados, foi possível construir, finalmente, o mapa de erosividade para a BHRP (Figura 3).

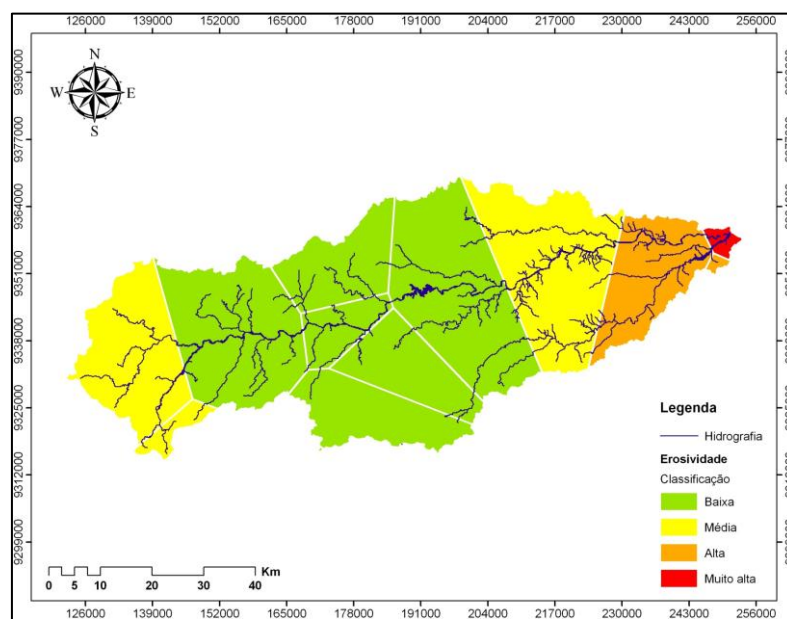


Figura 3 – Classificação da erosividade ao longo da BRHP.

Nesse mapa, percebe-se uma redução gradativa da erosividade no sentido leste para oeste, partindo dos Tabuleiros Costeiros até a Depressão Sertaneja, com classificação variando de alta até

baixa erosividade. Na região de Planalto da Borborema, a erosividade ganha intensidade, sendo classificada como média erosividade, sobretudo por ser constituída de feições com maiores altitudes.

2.2.2. Mapa de Erodibilidade

Neste trabalho, a erodibilidade dos solos da BHRP foi estimada através da equação proposta por Williams (1995), Equação 3, que consiste no produto de quatro fatores dependentes da textura do solo e da concentração de carbono orgânico.

$$k_{USLE} = f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand} \quad (3)$$

Considerando que f_{csand} , Equação 4, é o fator que retorna baixos valores de erodibilidade para solos com grandes quantidades de areia grossa e altos valores para solos com areia fina; f_{cl-si} , Equação 5, é fator que retorna baixos valores de erodibilidade para solos com grandes taxas de argila e silte; f_{orgc} , Equação 6, reduz a erodibilidade para solos com grandes quantidades de carbono orgânico; e f_{hisand} , Equação 7, é o fator que reduz a erodibilidade para solos com frações extremamente altas de areia.

$$f_{csand} = \left(0,2 + 0,3 \cdot \exp \left[-0,256m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (4)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} \quad (5)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0,25 \times orgC}{orgC + \exp[3,72 - 2,95 \times orgC]} \right) \quad (6)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0,7 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad (7)$$

Sendo m_s a porcentagem de areia contida no solo (partículas com diâmetros de 0,05-2,00 mm); m_{silt} a porcentagem de silte (partículas de 0,002-0,05 mm); m_c a porcentagem de argila (partículas com diâmetro < 0,002 mm); e $orgC$ a porcentagem de carbono orgânico na camada de solo.

O mapa de solos usado como base geográfica para aplicação da equação de erodibilidade foi disponibilizado pela SERHID (1998) por meio do Plano Estadual de Recursos Hídricos, PERH. Esse mapa foi construído a partir da antiga classificação dos solos, que se baseia no sistema de referência proposto por Camargo *et al.* (1987)

A fim de resolver a equação de Williams (1995), os dados de granulometria e de fração de carbono orgânico correspondentes aos solos que compõem a BHRP foram pesquisados nos perfis

que estão disponíveis no Levantamento dos Solos do Rio Grande do Norte, Jacomine (1971), e nas publicações do Projeto Radambrasil (Brasil, 1981).

O cálculo da erodibilidade, através da equação de Williams (1995), foi aplicado para as primeiras camadas dos perfis dos solos (camadas A e B), *solum*, tendo em vista que é a porção do solo que sofre diretamente os efeitos dos processos erosivos.

Para os Solos Indiscriminados de Mangue (SM) e para as Areias Quartzosas Marinhas (AMd1 e AMd2) não foram encontrados perfis. Porém, sabe-se pela literatura que, em geral, o grau de erodibilidade das Areias Quartzosas é alto, assim como são os solos litólicos (Ross, 1980; Silva *et al.*, 2004; Camargo, 1987; Valladares, 2010). Assim, para fins de classificação, às Areias Quartzosas Marinhas e aos Solos Indiscriminados de Mangue foi atribuído o mesmo grau de erodibilidade e as mesmas decisões que aos Solos Litólicos.

De posse dos valores de erodibilidade correspondentes a cada unidade de solo, e com fins de possibilitar a sobreposição com outros critérios (declividade, erosividade e ocupação do solo), foi necessário reclassificar esses valores na forma de *índice de sensibilidade*, ou em relação à intensidade de atuação dentro dos processos de erosão hídrica, com esse índice variando de 1 a 5 (Setegn *et al.*, 2009).

Para tanto, adotou-se como modelo a classificação proposta por Foster *et al.* (1981), que tem servido de referência para uma série de estudos, a exemplo dos de Mannigel *et al.* (2002), que expandiu a classificação para permitir mais três classes.

Para o caso específico deste trabalho, as classes de erodibilidade foram adaptadas de forma a impor que os Solos Litólicos e as Areais Quartzosas fossem classificados como de *alta* erodibilidade, assim como sugerem vários estudos feitos no Brasil (Mannigel *et al.*, 2002; Guerra e Cunha, 2006). A Tabela 2 ilustra as classes da erodibilidade dos solos finalmente aplicadas neste trabalho, assim como os índices de sensibilidade associados, variando de 1 a 5.

Tabela 2 - Classificação das erodibilidades para os solos da BHRP.

ERODIBILIDADE	CLASSIFICAÇÃO	ÍNDICE DE SENSIBILIDADE
< 0,007	Muito Baixa	1
0,0070 - 0,0140	Baixa	2
0,0140 - 0,0210	Média	3
0,0210 - 0,280	Alta	4
>0,280	Muito Alta	5

O resultado foi então reclassificado segundo a Tabela 2, de forma que os valores de erodibilidade, assim como os índices finais de erodibilidade associados a cada solo BHRP estão expostos através da Tabela 3.

Tabela 3 – Aplicação da classificação de erodibilidades aos solos da BHRP.

SOLO	CÓDIGO	$K_{USLE} - Solum$	ÍNDICE DE SENSIBILIDADE
Podzólico Vermelho-Amarelo	PVe10	0.0138	2
Latossolo Amarelo	LAd4	0.0139	2
Latossolo Amarelo	LAd3	0.0144	3
Podzólico Vermelho-Amarelo	PVetbpl8	0.0147	3
Solos Aluviais	Aeta1	0.0167	3
Solos Litólicos	RE16	0.0183	3
Bruno não cálcico	NC7	0.0187	3
Planossolo Solódico	PLsta1	0.0191	3
Bruno não cálcico	NC3	0.0198	3
Solos Litólicos	RE6	0.0211	4
Solos Litólicos	RE5	0.0218	4
Solos Litólicos	RE14	0.0230	4

Por fim, a construção do mapa de erodibilidades para a BHRP foi feita através da aplicação dos índices da Tabela 3 para cada solo através de ferramentas em ambiente de SIG. Esse mapa pode ser avaliado por meio da Figura 4

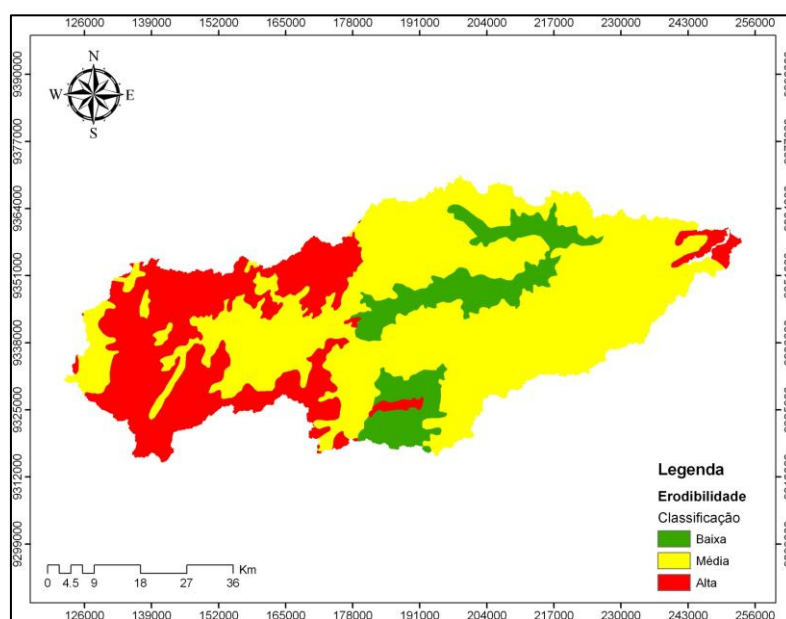


Figura 4 - Erodibilidade dos solos da BHRP.

Nota-se, com esse mapa, que a maior parte dos solos de alta erodibilidade está localizada na região oeste da bacia, onde se manifestam os Solos Litólicos. Porém, também é possível observar erodibilidade alta no extremo leste da bacia, no contado com o estuário, onde se manifestam as Areias Quartzosas. No centro da bacia, ou na Depressão Sertaneja, é onde se manifestam regiões de baixa erodibilidade, relacionadas com a ocorrência de solos Podzólicos e Latossolos.

2.2.3. Mapa de Declividades

O entendimento da configuração topográfica de qualquer bacia hidrográfica é de suma importância para avaliar a sua suscetibilidade à erosão; quanto maior a inclinação das vertentes do terreno, maior a velocidade do escoamento superficial que nele se desenrola e maior a energia

aplicada ao solo. Assim, a declividade “exerce acentuada influência sobre a erosão, o tamanho e a quantidade do material em suspensão arrastado pela água” (Bertoni e Lombardi Neto, 2005).

A fim de desenvolver o mapa de declividades da BHRP, fez-se uso de um modelo digital de terreno (MDT) que contempla a região de estudo. Esse MDT foi obtido a partir do projeto do TOPODATA, banco de dados geomorfométricos do Brasil, vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por meio de seu portal da internet (INPE, 2010).

De posse do MDT, as declividades foram calculadas em plataforma SIG com posterior reclassificação segundo a Tabela 4. O resultado com a distribuição das classes de declividade pode ser visto através do mapa exposto pela Figura 5.

Tabela 4– Classificação usada para as declividades do terreno da BHRP.

DECLIVIDADE (%)	CLASSIFICAÇÃO	ÍNDICE DE SENSIBILIDADE
0 – 5	Muito baixa	1
5 – 10	Baixa	2
10 – 15	Média	3
15 – 20	Alta	4
> 20	Muito alta	5

Nota-se, através da Figura 5, uma concentração das declividades mais altas na porção mais a oeste da bacia, coincidindo com o Planalto da Borborema, região de maiores altitudes e onde se localizam as nascentes da rede hídrica da BHRP.

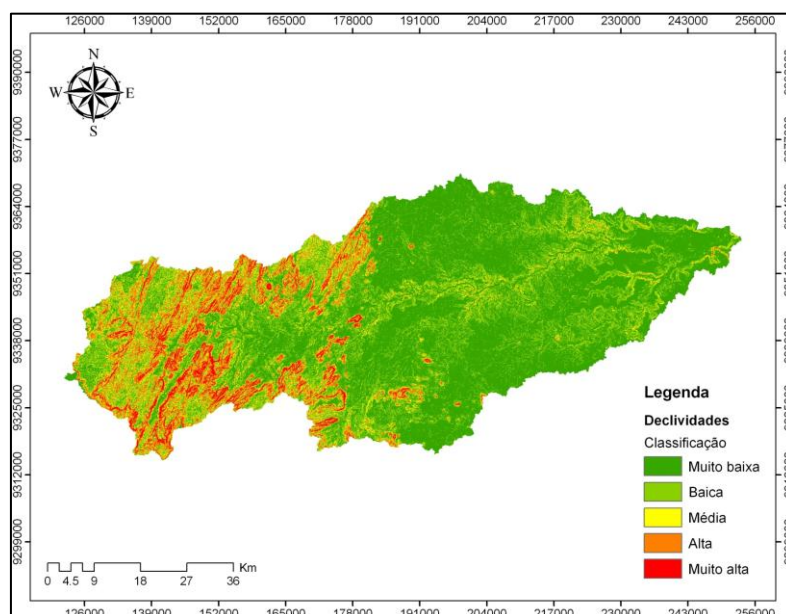


Figura 5 – Classificação das declividades quanto ao grau de contribuição para os processos erosivos

2.2.4. Mapa de Cobertura do Solo

A cobertura do solo precisa receber atenção especial diante dos processos erosivos, uma vez que a qualidade da cobertura determina o grau de proteção do solo ou sua vulnerabilidade. Ademais, a cobertura do solo é um critério que carrega a característica de estar constantemente em transformação pelas atividades humanas, de forma que a atualização do mapa de cobertura é essencial para o entendimento da dinâmica de ocupação, das alterações de paisagens, da evolução dos processos erosivos e para o planejamento e manejo de bacias hidrográficas.

O mapa de cobertura de solo foi desenvolvido a partir de uma classificação pelo método da *Máxima Verossimilhança* aplicado a duas imagens captadas pelo satélite LANDSAT-7, através do sensor EMT, e disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Uma das imagens contempla a metade oriental da BHRP e corresponde à órbita/ponto 214/064 datada de 04/08/2001. Já para a metade ocidental da bacia, fez-se uso da imagem LANDSAT-7 que corresponde à órbita/ponto 215/064 datada de 11/06/2002. Ambas as imagens foram compostas em RGB 543.

Após a construção do mapa de cobertura do solo, foi preciso ranquear os tipos de cobertura quanto a sua provável contribuição para o desencadeamento dos processos de erosão hídrica. Para tanto, elegeu-se a classe *corpos hídricos* como referência de menor contribuição, uma vez que os corpos d'água são tidos como *corpos receptores*, ou seja, é a classe que sofre os efeitos da erosão e exerce contribuição desprezível. Como referência oposta, posiciona-se a classe de *solo exposto*, que certamente deve receber o título de mais alta suscetibilidade à erosão, diante da sua incapacidade evidente de fornecer qualquer proteção ao solo.

Assim, a Tabela 5 expõe o resultado da atribuição do índice de sensibilidade, ou de contribuição, à erosão hídrica, bem como o significado classificatório de cada índice, associados a cada tipo de cobertura presente na bacia; e a Figura 6 apresenta o mapa resultante da aplicação desses índices de sensibilidade aos tipos de cobertura do solo.

Tabela 5 - Resultado da classificação dos tipos de cobertura do solo definidos para a BHRP segundo suas sensibilidades aos processos erosivos.

TIPOS DE COBERTURA	Área (%)	CLASSIFICAÇÃO	ÍNDICE DE SENSIBILIDADE
Agricultura e Pastagens e vegetação em regeneração	17,0	Alta	4
Solo Exposto	4,5	Muito alta	5
Estruturas Urbanas	3,0	Média	3
Vegetação Densa	28,0	Baixa	2
Vegetação Pouco Densa	45,0	Média	3
Corpos Hídricos	2,5	Muito Baixa	1

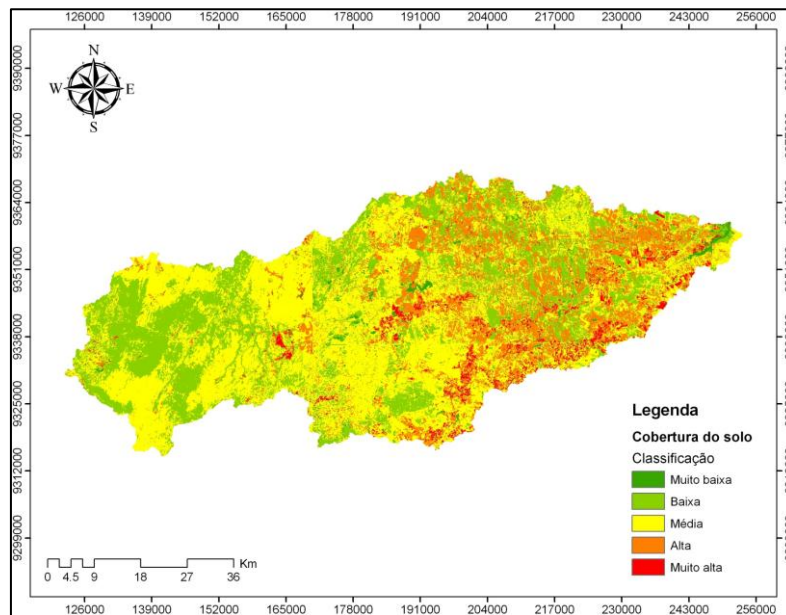


Figura 6 – Classificação da cobertura do solo quanto ao grau de contribuição para os processos erosivos

Nesse mapa é possível observar com facilidade que a configuração de cobertura do solo da região leste da bacia hidrográfica contribui de forma mais significativa para a erosão hídrica por conferir menos proteção ao solo.

2.3. Álgebra de sobreposição dos mapas

A construção do mapa de suscetibilidade à erosão hídrica envolveu a sobreposição de quatro critérios, sendo eles, cobertura do solo (C1), declividade (C2), erosividade (C3) e erodibilidade (C4). Considerando que esses critérios atuam por diferentes mecanismos nos processos erosivos, tendo, por conseguinte, magnitudes distintas de contribuição, é conveniente que esses critérios sejam postos numa hierarquia de importâncias e que a eles sejam atribuídos pesos de importância relativa a partir de *comparações pareadas*, assim como sugere a metodologia de avaliação multicriterial proposta por Saaty (1998) através do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Os métodos convencionais de medidas, em geral, atribuem valores aos critérios em questão de forma independente, um a um, via escala física, ou seja, um único valor é associado a cada critério ou elemento.

O método AHP, por sua vez, faz uso de uma *comparação pareada*, na qual os valores aplicados a cada elemento são frutos da relação deste com cada um dos outros elementos que fazem parte da análise, de maneira que um critério precisa ser comparado com todos os outros, na forma de pares, e cada comparação derivará um valor ou taxa de importância. Segundo Siddiqui *et. al* (1996), a comparação pareada de todos os critérios envolvidos é a ferramenta usada para estabelecer as importâncias relativas dentro da hierarquia de elementos.

De acordo com Saaty (1998, 2006), os julgamentos exercidos na comparação pareada respeitam uma escala de números absolutos denominada *Escala Fundamental*, ilustrada pela Tabela 6.

Tabela 6 - Escala fundamental proposta por Saaty (1998).

IMPORTÂNCIA RELATIVA	DESCRIÇÃO	IMPORTÂNCIA RELATIVA	DESCRIÇÃO
1	Igual importância	7	Importância muito grande
3	Importância pequena	9	Importância absoluta
5	Importância grande	2, 4, 6, 8	Valores intermediários

Em seguida, os julgamentos citados são postos de forma a compor uma matriz recíproca, **A**, chamada *matriz de julgamento* ou *matriz de comparação pareada*, sendo seus valores numéricos correspondentes às importâncias relativas.

Segundo Ying et al. (2007) e Store e Antikainen (2010), a *matriz de julgamentos* “**A**” pode ser genericamente escrita da forma como indica a Equação 8.

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & V_1/V_2 & \dots & V_1/V_n \\ V_2/V_1 & 1 & \dots & V_2/V_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_n/V_1 & V_n/V_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sendo que V_i/V_j é a taxa de importância entre o critério *i* e o critério *j*, enquanto *n* é o número de critérios em estudo e a ordem da matriz.

O peso absoluto, \bar{P}_i , associado aos critérios C1, C2, C3 e C4, pôde ser obtido através da média geométrica aplicada para cada linha da matriz **A**, como mostra a Equação 9.

$$\bar{P}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (9)$$

O peso final a ser aplicado a cada critério, P_i , é obtido através da normalização dos pesos absolutos, \bar{P}_i , Equação 10.

$$p_i = \frac{\bar{p}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{p}_i}, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

A fim de avaliar a consistência do vetor de pesos gerado, foi preciso primeiramente calcular o *máximo autovalor*, λ_{max} , através da Equação 11

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AP)_i}{p_i} \quad (11)$$

Considerando que P é o autovetor correspondente a λ_{max} , com p_i ($i = 1, 2, 3, 4$) sendo os pesos para ranqueamento, e considerando que:

$$AP = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}.$$

Em seguida, λ_{max} serviu de base para o cálculo do *índice de consistência*, IC, através da Equação 12, sendo n a ordem da matriz ou o número de critérios envolvidos.

$$IC = \frac{|\lambda_{max} - n|}{n - 1} \quad (12)$$

Finalmente, calcula-se a *razão de consistência*, RC, como indica a Equação 13, sendo IR um valor tabelado e dependente de n , como exposto na Tabela 7. Segundo Saaty (1998), os pesos finais obtidos podem ser considerados consistentes desde que o valor da razão de consistência não ultrapasse 0.1 ou 10%.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (13)$$

Tabela 7 – Valores tabelados para IR.

n	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Uma vez a par do método de avaliação multicriterial, o estabelecimento dos pesos para os critérios envolvidos teve início na hierarquização dos mesmos. Para tanto, foram consideradas algumas constatações desenvolvidas por outros autores ao se debruçarem sobre a sensibilidade dos critérios aqui investigados.

Setegn *et al.* (2009) aplicaram o modelo SWAT almejando estimar a produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Lago Tana, na Etiópia. Em seguida avaliaram a vulnerabilidade à erosão na mesma bacia através de avaliação multicriterial, calibrando com o resultado da aplicação do SWAT. Dentre as conclusões do estudo, constatou-se que a cobertura do solo e a declividade devem receber maiores prioridades quanto às suas importâncias relativas dentro dos processos erosivos. Ressaltando ainda um maior destaque para a cobertura do solo.

Weill e Sparovek (2008), estudando a sensibilidade dos fatores do modelo EUPS aplicado à Microbacia do Ceveiro em Piracicaba-SP, notaram que o efeito do fator LS - relativo à configuração

do relevo - sobre as taxas de perda de solo foi muito mais acentuado que o efeito devido à variação da erodibilidade do solo, ou fator K, quando são considerados constantes os outros fatores da equação.

Renard *et al.* (1991; 1993), trabalhando com a sensibilidade dos fatores da EUPS e da EUPS-R (revisada), afirmam que, por conta da grande abrangência de possíveis valores, o fator K pode ter uma importância ligeiramente superior ao fator R.

Avaliando as conclusões alcançadas pelos autores acima citados, os critérios foram postos em uma ordem hierárquica de importâncias: *Ordem de importâncias* = $C1 > C2 > C3 > C4$. Em seguida, foi elaborada a matriz de julgamento para, então, calcular os pesos de cada critério. A Tabela 8 expõe os valores aplicados à matriz de julgamentos, assim como os pesos finais associados a cada critério. O autovalor máximo, λ_{max} , foi de 4,0155, resultando numa razão de consistência de 0,0057.

Tabela 8 – matriz de julgamento com os pesos resultantes para cada critério estudado.

A	C1	C2	C3	C4	Pesos Normalizados
C1	1	2	4	5	0,5084
C2	1/2	1	2	3	0,2672
C3	1/4	1/2	1	1	0,1297
C4	1/5	1/3	1	1	0,1033

Com base nos pesos encontrados para cada critério, foi possível desenvolver a equação de sobreposição dos mapas de cada critério, Equação 14, aplicada através de um SIG, especificamente por meio da ferramenta denominada *Weighted overlay*.

$$\text{Sobreposição} = 0,5084C1 + 0,2672C2 + 0,1297C3 + 0,1033C4 \quad (14)$$

3. RESULTADOS

O resultado da aplicação da álgebra de mapas resultou no mapa de suscetibilidade à erosão hídrica, Figura 7, reclassificado, neste trabalho, para conter três classes: baixa, média e alta, apontando predominância de suscetibilidade média, compondo 65% da BHRP. Nesse mapa, percebe-se, com razoável nitidez, que a região central da bacia, onde predomina a Depressão Sertaneja, apresenta-se como a porção de menor suscetibilidade, enquanto as áreas mais suscetíveis da bacia estão situadas em sua cabeceira oeste e na região mais a leste.

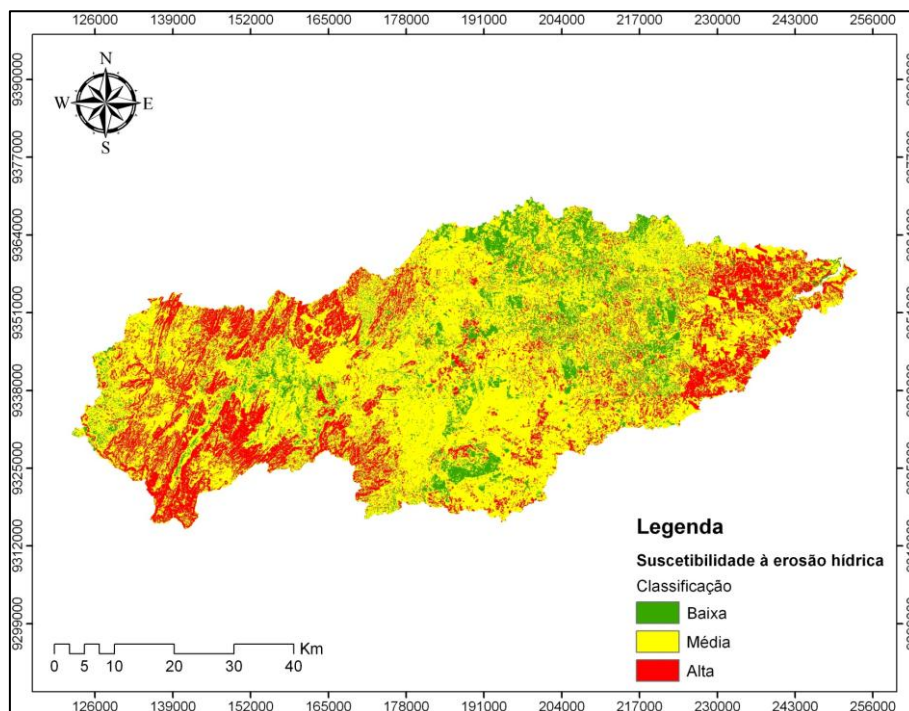


Figura 7 – Mapa de suscetibilidade à erosão hídrica

Nas regiões de cabeceira oeste da bacia, onde se revelam o Planalto da Borborema e as nascentes da rede hídrica, a erosão é impulsionada pelas grandes declividades aliadas aos solos frágeis. Trata-se de uma região com significativo potencial natural para sofrer erosão hídrica, mas que é amortecido pela cobertura vegetal, mesmo que pouco densa, como em geral é a Caatinga.

Entende-se, porém, que caso a supressão da Caatinga avance também nessas áreas, a erosão pode ser potencializada e as taxas de produção de sedimentos serão seriamente incrementadas, o que justifica a aplicação de investimentos com fins de preservação dessa porção da BHRP.

Já para a região leste da bacia, onde se revelam os Tabuleiros Costeiros, os resultados se direcionaram para o entendimento de que essa região, por força de sua própria natureza, não contribui significativamente com aporte de sedimentos para o leito do rio Potengi, de forma que a maior parte da erosão é consequência predominante das atividades antrópicas que se desenvolvem na região, seja na forma de urbanização, através dos cultivos, ou pela atividade pecuária.

Diante disso, recomenda-se que à região leste da bacia sejam aplicados esforços prioritariamente em âmbito de recuperação, buscando o planejamento e o controle das atividades exercidas em suas áreas, além da preservação das áreas naturais remanescentes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou avaliar a suscetibilidade à erosão hídrica ao longo da BHRP, o que permitiu identificar particularidades em regiões geomorfologicamente distintas da bacia.

Os resultados deste trabalho, em consonância com diversos outros, alertam para os riscos do avanço de um processo inadequado de alteração da cobertura natural do solo. Além disso, há de se ressaltar a necessidade de que se desenvolvam planos adequados de ocupação territorial que

contemplem prioritariamente as regiões selecionadas como críticas, cabeceira oeste da bacia e região do baixo rio Potengi, com base em mapas de suscetibilidade à erosão.

Na verdade, versa-se sobre uma questão óbvia; os problemas erosivos são uma constatação e dentre os critérios intervenientes a cobertura do solo é o único passível de interferência antrópica direta e imediata. Dessa forma, deve ser tratada como objeto essencial em estudos que visem à minimização dos processos erosivos na BHRP. É preciso acompanhar e controlar os processos acelerados e inescrupulosos de uso e ocupação do território. Todavia, ainda é demasiado deficiente o arcabouço de ferramentas postas em uso para esses fins.

Espera-se que este trabalho contribua para motivar futuras pesquisas na área e incitar as discussões voltadas para o manejo da BHRP, incluindo o planejamento das formas de ocupação e das atividades exercidas em seu território.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de fomento vinculada ao processo 135909/2008-2.

BIBLIOGRAFIA

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (2005). *Conservação do solo*. Ed. 5 São Paulo: Ícone.
- BRASIL. (1981) Ministério de Minas e Energia. Secretaria-Geral Projeto Radambrasil. *Folhas SB 24/25 Jaguaribe/Natal: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro: MME/Secretaria-Geral.
- CAMARGO, M. N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J. H. (1987) *Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil*. Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas 12, pp. 11-13.
- CUNHA, E. M. S. da. (2004). *Evolução atual do litoral de Natal - RN (Brasil) e suas aplicações à gestão integrada*. 2004. 393 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências do Mar, Departamento de D'ecologia, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- DYER, K. R. (1997) *Estuaries: a physical introduction*. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 195p.
- EMBRAPA (1999), Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Emprapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MODENHAUER, W. C. (1981) *Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units*. Journal of Soil and Water Conservation 36, pp. 355-359.
- GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (Organizadores) (2010). *Geomorfologia e Meio Ambiente*. 6. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- IBGE (2010). Rio Grande do Norte: Estimativa da população 2009. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 04 out. 2010.
- IDEMA (2010). *Relatório de Sobrevôo: Estuário Jundiáí-Potengi*. Natal. (Programa Estadual de Monitoramento e Fiscalização Ambiental Aéreos).

- IDEMA (2010). Sigga Web. Disponível em: <<http://200.149.240.140:8080/i3geo/>>. Acesso em: 18 out. 2010.
- JACOMINE, P. K. T. (1971) *Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado do Rio Grande do Norte*. Recife: MA/DNPEA.
- MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. de P. e; MORETI, D.; MEDEIROS, L. da R. (2002) *Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo*. Acta Scientiarum 24, pp. 1335-1340.
- RENARD, K. G.; FERREIRA, V. A. (1993) *RUSLE Model Description and Database Sensitivity*. J. Environ. Qual. 22, pp. 458-466.
- RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; PORTER, J. P. (1991) *RUSLE – Revised universal soil loss equation*. Journal of Soil and Water Conservation 46, pp. 30-33.
- ROSS, J. L. S. (1992) *Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados*. Revista do Depto. de Geografia (FFLCH-USP) 6, pp. 17-30.
- SAATY, T. L. (2006) *Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes*. European Journal of Operational Research 168, pp. 557-570.
- SAATY, T. L.; HU, G. (1998) *Ranking by eigenvector versus other methods in the Analytic Hierarchy Process*. Appl. Math. Lett. 11, pp. 121-125.
- SERHID - SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS (1998). *Plano Estadual de Recursos Hídricos: Relatório diagnóstico dos dados e informações disponíveis*. Rio Grande do Norte.
- SETEGN, S. G.; SRINIVASAN, R.; DARGAHI, B.; MELESSE, A. M. (2009). *Spatial delineation of soil erosion vulnerability in the Lake Taba Basin, Ethiopia*. Hydrological Processes 23, pp. 3738-3750.
- SILVA, A. M. da (2004). *Rainfall erosivity map for Brazil*. Catena 57, pp. 251-259.
- SILVA, A. M. da; CAMARGO, P. B. de; SCHULZ, H. E. (2004). *Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas*. São Carlos Sp: RiMa,. 140 p.
- STORE, R.; ANTIKAINEN, H. (2010). *Using GIS-based multicriterial evaluation and path optimization for effective forest field inventory*. Computers, Environment and Urban Systems 34, pp. 153-161.
- VALLADARES, G. S. (2010). SISTEMA DE GESTÃO TERRITORIAL DA ABAG/RP: Área de estudo: Pedologia. Disponível em: <<http://www.abagrp.org.br/monitoramento/areas/pedologia.htm>>. Acesso em: 20 out. 2010.
- WEILL, M. de A. M.; SPAROVEK, G. (2008). *Estudo da erosão na Microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I – Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS*. R. Bras. Ci. Solo 32, pp. 801-814.
- WILLIAMS, J. R. (1995). *The EPIC model*. p. 909-1000. In SINGH, V. P. (ed.). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- YING, X.; GUANG-MING, Z.; GUI-QIU, C.; LIN, T.; KE-LIN, W.; DAO-YOU, H. (2007). *Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality – A case study of Hunan Province, China*. Ecological Modelling 209, pp. 97-109.