

**Walquiria Marins da Silva**

**Variação espacial e temporal da sedimentação fluvial na região do MATOPIBA e sua  
influência no sistema energético**

Guaratinguetá - SP  
2018

**Walquiria Marins da Silva**

**Variação espacial e temporal da sedimentação fluvial na região do MATOPIBA e sua influência no sistema energético**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões  
Co-orientadora: Prof. Dra. Luciene Gomes

Guaratinguetá - SP  
2018

S586v Silva, Walquiria Marins da  
Variação espacial e temporal da sedimentação fluvial na região do MATOPIBA e sua influência no sistema energético / Walquiria Marins da Silva – Guaratinguetá, 2018.  
67 f : il.  
Bibliografia: f. 65-67

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões

Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciene Gomes

1. Bacias sedimentares. 2. Geologia - Métodos estatísticos.
3. Descargas elétricas. I. Título.

CDU 556.51(043)

*WALQUIRIA MARINS DA SILVA*

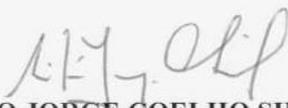
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

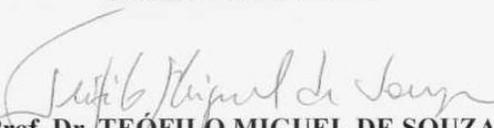
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: ENERGIA

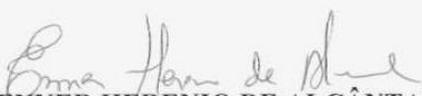
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Ana Paula Rosilini Alves Claro  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMÕES  
Orientador / UNESP-ICT/SJC

  
Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. ENNER HERENIO DE ALCÂNTARA  
UNESP-ICT/SJC

*Fevereiro de 2018*

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES).

## RESUMO

O presente estudo tem como objetivo deste trabalho avaliar o potencial de risco de redução de produção de energia por UHE e PCH devido a descarga de sedimentos na Bacia do Tocantins, região que está localizada no MATOPIBA e avaliar a influência dos sedimentos no sistema energético baseado em hidroeletricidade. Para isto, foram gerados modelos espaciais da quantidade de sedimentos através da descarga sólida em suspensão para os anos 2010, 2012 e 2014, nos períodos chuvosos e secos. A abordagem geoestatística foi adotada para avaliação da variabilidade espacial dos sedimentos fluviais da região, através do método Krigagem aplicado em um ambiente SIG (Geostatistical Analysis / ArcGIS®). Os dados sedimentométricos foram obtidos no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA). Os resultados demonstraram que a quantidade de sedimentos fluviais é fortemente influenciada pela precipitação no período chuvoso, com valores máximos próximos de  $2,2 \times 10^6$  t/trimestre e que podem chegar a um aumento de 500% em relação ao período seco. O uso da terra foi identificado como um importante driver na variação temporal da quantidade de sedimentos, em que os valores máximos identificados em 2010 ( $1,0 \times 10^6$  a  $2,7 \times 10^6$  t/trimestre) reduziram significativamente em relação a 2014 ( $0,6 \times 10^6$  a  $1,0 \times 10^6$  t/trimestre). Baseado nisso, foi possível identificar áreas com maior potencial para implantação de novas hidrelétricas na região estudada. A modelagem utilizando a geoestatística foi eficiente na avaliação da variabilidade espacial de sedimentos fluviais em cenários com escassez de dados e também foi eficaz para avaliação temporal de dados hidrossedimentológicos. Os dados hidrossedimentológicos são informações significativas que podem auxiliar na identificação das principais fontes de sedimentos e contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para melhorias das ações de controle do assoreamento nos reservatórios das hidrelétricas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sedimentos fluviais. Geoestatística. Descarga sólida em suspensão.

## ABSTRACT

The main goals of this study was to perform a spatial and temporal analysis of water sedimentology hydric processes and evaluate the influence of sediments on energy system, specifically hydroelectric power, in the MATOPIBA region. For this, we produced sediments spatial models using sediment discharge values for the years 2010, 2012 and 2014 for both rainy and dry seasons. We used geostatistical techniques to evaluate the spatial variability of river sediments, being the kriging method applied in a GIS environment. We obtained sediment data from the database of the National Water Agency (ANA). The results showed that the sediment quantity is influenced by precipitation during the rainy season, with maximum values of  $2.2 \times 10^6$  t/quarter. This result is 500% higher than the sediment quantity produced in the dry season. The land-use was the main driver to temporal variation of sediments production over time. In 2010 ( $1,0 \times 10^6$  a  $2,7 \times 10^6$  t/quarter) the sediment production was lower than in 2012 ( $0,6 \times 10^6$  a  $1,0 \times 10^6$  t/quarter). Based on this, it was possible identify new potential areas to build hydroelectric plants in the MATOPIBA region. The geostatistics was an efficient technique to evaluate the spatial variability of river sediments using few data and it was effective to evaluate temporal variation of these sediments data. Sediments data are important because they support the identification of main sources of sediment production and can contribute to development of efficient strategies to control silting in hydroelectric plants reservoirs.

**KEYWORDS:** River Sediments. Geostatistics. Solid discharge in suspension.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais componentes do ciclo hidrológico .....	17
Figura 2 - Formação típica do delta.....	23
Figura 3 - Amostragem em duas dimensões.....	25
Figura 4 - Exemplo de semivariograma .....	26
Figura 5 - Representação gráfica de modelos transitivos normalizados. ....	27
Figura 6 - (a) Conjunto de dados amostrados; (b) rede regular superposta; (c) estimativa do valor desconhecido no ponto de coordenadas em vermelho e (d) estimativa dos pontos da rede regular .....	28
Figura 7 – Localização da região do MATOPIBA.....	30
Figura 8 – Características predominantes do bioma na região do MATOPIBA.....	31
Figura 9 - Características predominantes do relevo na região do MATOPIBA .....	32
Figura 10 – (a) Regiões hidrográficas e (b) Mapa das sub-bacias e rede de drenagem do MATOPIBA .....	33
Figura 11 – Distribuição dos domínios climáticos na região do MATOPIBA .....	34
Figura 12 – Características predominantes de solos na região do MATOPIBA.....	35
Figura 13 - Perfil de latossolo vermelho situado próximo a Porto Nacional (TO) .....	36
Figura 14 - Perfil de neossolo quartzarênico órtico típico, situado próximo a Gilbués (PI)...	37
Figura 15 - Perfil de plintossolo pétrico, situado próximo a Lagoa da Confusão (TO) .....	38
Figura 16 - Área fortemente erodida, com ocorrência de argissolos vermelhos (Gilbués, PI). .....	38
Figura 17 - Mapa de localização das estações fluviométricas (ArcGIS®) .....	47
Figura 18 - Ferramenta de ajuste do variograma no ArcGIS® .....	48
Figura 19 – Mapas de uso da terra MATOPIBA – Região do estado de Tocantins.....	51
Figura 20 – Mapas temáticos: (a) bioma; (b) relevo, (c) clima e (d) solos. ....	53
Figura 21 – Modelos espaciais de descarga sólida em suspensão – Anos 2010,2012 e 2014. Período chuvoso .....	55
Figura 22 – Comparativo dos mapas de descarga de sedimentos e uso da terra – período chuvoso .....	57
Figura 23 – Comparativo dos mapas de descarga de sedimentos e uso da terra – período seco .....	58
Figura 24 – Mapas de descarga sólida em suspensão do MATOPIBA (região Tocantins), períodos chuvoso e seco do ano de 2014.....	59

Figura 25 – Localização das UHE e PCH do MATOPIBA (região Tocantins).....	61
Figura 26 – Localização das UHE e PCH no modelo espacial de descarga sólida em suspensão - período chuvoso .....	62
Quadro 1 - Fatores condicionantes dos processos erosivos.....	15
Quadro 2 - Classes de cobertura e uso da terra .....	41
Quadro 3 – Definição dos períodos dos dados analisados.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações dos registros do banco de dados Ana.....	43
Tabela 2 - Relação das sub-bacias e estações com dados sedimentométricos – 2012. ....	43
Tabela 3 - Número de dados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e descarga líquida (Q) da bacia Tocantins, 2012 .....	45
Tabela 4 – Relação de UHE e PCH localizadas na área de estudo .....	49
Tabela 5 - Previsão de aumento de potência (kW) para atendimento ao crescimento do MATOPIBA. ....	63

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1 OBJETIVOS.....	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
2.1 HIDROSSEDIMENTOLOGIA.....	12
2.2 EROÇÃO E TÉCNICAS DE CONTROLE.....	14
2.3 ÁGUAS SUPERFICIAIS .....	17
2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A DINÂMICA DOS SEDIMENTOS FLUVIAIS ....	18
2.5 AVALIAÇÃO DO ASSOREAMENTO DOS RESERVATÓRIOS .....	22
2.6 GEOESTATÍSTICA.....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	30
3.2 LEVANTAMENTO DOS MAPAS TEMÁTICOS RELACIONADOS AO PROCESSO EROSÃO) .....	39
3.3 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NOS SISTEMAS FLUVIAIS E NOS RESERVATÓRIOS COM BASE EM UM MODELO ESPACIAL .....	42
3.4 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E A DISTRIBUIÇÃO DAS HIDRELÉTRICAS NA ÁREA DE ESTUDO .....	48
3.5 IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS COM MAIOR POTENCIALIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE NOVAS HIDRELÉTRICAS.....	49
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1 MAPAS TEMÁTICOS RELACIONADOS AO PROCESSO EROÇÃO .....	50
4.2 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NOS SISTEMAS FLUVIAIS E NOS RESERVATÓRIOS COM BASE EM UM MODELO ESPACIAL .....	53
4.3 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E A DISTRIBUIÇÃO DAS HIDRELÉTRICAS.....	60
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS ..</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A ação humana tem afetado o transporte de sedimento nos rios de duas maneiras simultâneas: aumentando a produção de sedimentos através da erosão do solo e diminuindo a produção de sedimentos através de sua retenção em reservatórios (DIDONÉ *et al.*, 2014; XU; MILLIMAN, 2009). O Brasil é o segundo maior produtor mundial de hidroeletricidade, sendo responsável por 12% do que é produzido globalmente. Esta produção é responsável por 65,2% do fornecimento de eletricidade nacional (RUFFATO-FERREIRA *et al.*, 2017). O aumento da demanda energética e hídrica tem favorecido a construção de reservatórios para fins de abastecimento e geração de energia através de hidrelétricas ou Pequenas Centrais Hidrelétricas (SANTOS, 2015). Porém, um estudo realizado pelo Banco Mundial afirma que os reservatórios têm perdido 1% de sua capacidade por ano devido ao assoreamento. Esta perda afeta significativamente a geração de energia. No Brasil, a perda anual da capacidade dos reservatórios é igual ou maior a 0,5%, correspondendo a dois bilhões de metros cúbicos por ano (Carvalho 2008). Este número equivale a um volume maior do que o encontrado em alguns médios reservatórios existentes, como os reservatórios de Jaguari, Salto Osório e Porto Colômbia localizados na região Sul-Sudeste e o reservatório de Moxotó localizado na região Nordeste (CARVALHO *et al.*, 2000).

O aumento das cargas de sedimentos nos rios reflete o aumento na taxa de erosão gerada pela expansão da agricultura. Estima-se que cerca de 10% do total da superfície terrestre tem sido afetada pela erosão e degradação do solo Walling and Fang (2003). Sendo assim, o aprofundamento nos estudos e no conhecimento dos processos e impactos sedimentológicos é cada vez mais importante para se alcançar sucesso técnico e ambiental. Este conhecimento é estratégico para definição de empreendimentos hidráulicos como reservatórios, barragens, canais e tomadas de água (Carvalho 2008).

A formam o MATOPIBA, que. A Bacia do Tocantins está localizada no MATOPIBA (região dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) onde concentram-se as maiores taxas de desmatamento ocorridas no Brasil nos últimos anos em decorrência da rápida expansão e intensificação agropecuária na região (MMA, 2016), o que influencia no cenário energético brasileiro devido a presença de importantes hidrelétricas e PCH, como a usina hidrelétrica de Estreito. Esta região é conhecida como última fronteira agrícola brasileira e o monitoramento das variáveis envolvidas no processo hidrossedimentológico é uma ferramenta importante para compreender os efeitos do uso e manejo do solo na produção de sedimentos

nos rios e auxiliar a gestão e o planejamento de ações que previnem os impactos negativos destes processos.

Dentro de um ambiente de modelagem computacional SIG (Sistema de Informação Geográfica), a geoestatística foi o método escolhido neste trabalho para a realização de uma análise Hidrossedimentológica e Geoespacial na avaliação dos impactos no sistema energético da região do MATOPIBA. A Geoestatística tem como objetivo a determinação de correlação espacial dos dados e são métodos de estimativa e simulação estocástica que utilizam um modelo chamado de variograma, que utiliza características espaciais e a orientação preferencial do fenômeno em estudo (LANDIM; YAMAMOTO, 2013). Uma das técnicas de interpolação do método de Geoestatística é a krigagem que utiliza informações relacionadas a um ou vários atributos e pode ser definida como um conjunto de técnicas de regressão linear generalizada para minimizar uma estimativa variância definida a partir de um modelo de covariância, uma medida de variabilidade espacial (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Burrough (2015) afirma que quando os dados são abundantes, os métodos tradicionais de interpolação espacial, como triangulação, média local das amostras e método da distância inversa, produzem valores semelhantes. No caso de dados esparsos, tais métodos possuem limitações na representação da variabilidade espacial, porque desconsideram a anisotropia e a continuidade do fenômeno que se quer observar. Assim, modelos inferenciais para este objetivo vem sendo propostos, como os métodos geoestatísticos.

Para isto, foram gerados modelos espaciais da quantidade de sedimentos através descarga sólida em suspensão para os anos 2010, 2012 e 2014, nos períodos chuvosos e secos. Estes auxiliaram a análise da relação da produção de sedimentos e distribuição das hidrelétricas da região e a identificação de áreas com maior potencialidade para implantação de novas hidrelétricas.

## 1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de risco de redução de produção de energia por UHE e PCH devido a descarga de sedimentos na Bacia do Tocantins.

Os objetivos específicos são:

- a) Levantar mapas temáticos relacionados ao processo erosão – sedimentação (pedologia, geomorfologia, drenagem natural e uso da terra);
- b) Avaliar a produção de sedimentos nos sistemas fluviais e nos reservatórios com base em um modelo espacial;
- c) Avaliar a relação entre produção de sedimentos e a distribuição das hidrelétricas na área de estudo;
- d) Identificar as áreas com maior potencialidade para implantação de novas hidrelétricas, com base no meio físico e na distribuição espacial dos sedimentos fluviais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 HIDROSEDIMENTOLOGIA

O sedimento pode ser definido como a partícula derivada da fragmentação das rochas que pode ser transportada por fluido, como água ou vento, do local de origem aos rios e aos locais de deposição. O sedimento é o material em suspensão na água ou depositado no leito dos rios e lagos. A disciplina que estuda este material com ênfase na relação água-sedimento, considerando os processos hidroclimatológicos, é chamada de Hidrossedimentologia (CARVALHO, 2008).

No ciclo hidrossedimentológico, o escoamento superficial é o principal responsável pelo transporte dos sedimentos e são influenciados pelas condições topográficas do local e pela granulometria dos materiais carreados (ARROIO JUNIOR, 2013). Os rios possuem um papel importante no ciclo geoquímico natural e do movimento do material da terra para os oceanos. São os principais responsáveis pela transferência de água, sedimentos e outros materiais de terras para os oceanos (WALLING; FANG, 2003; WANG *et al.*, 2011).

Os sedimentos presentes nos rios são gerados frequentemente pela erosão da bacia hidrográfica, estas são influenciadas fortemente pelo uso do solo, sendo assim o conhecimento destes processos é essencial. Os fatores que interferem na produção de sedimentos como solo, clima, topografia, cobertura do solo e área de drenagem, a taxa de transporte de sedimentos em rios, granulometria das partículas transportadas, e o relacionamento das características químicas dos sedimentos com a qualidade da água devem ser considerados (SANTOS, 2015).

A sedimentação é composta por processos complexos que abrange erosão, deslocamento das partículas até os rios, transporte do sedimento nos cursos d'água, deposição do sedimento na calha dos rios, lagos e reservatórios e sua compactação (CARVALHO, 2008). O estudo da relação da erosão e uso do solo é fundamental para o conhecimento da sedimentação, pois a maioria dos sedimentos presentes nos rios é oriunda da bacia hidrográfica (SANTOS, 2015).

Carvalho (2008) afirma a capacidade de transporte de sedimentos dos rios é limitada, está diretamente relacionada com a e com a vazão declividade dos cursos d'água, além da granulometria das partículas suspensas. No ciclo hidrossedimentológico o aumento do tamanho do sedimento e velocidades baixas do fluxo dos rios são os fatores responsáveis pela deposição.

O ciclo hidrossedimentológico inicia-se com o processo de desagregação e deslocamento das partículas do solo ou fragmentos de rochas, etapa definida como erosão. Fenômenos que agem de forma combinada como vento, água, gravidade ou organismos, são responsáveis pela remoção, transporte e deposição (ARROIO JUNIOR, 2013). A produção dos sedimentos é afetada pelos principais fatores descritos a seguir (CARVALHO *et al.*, 2000)

- Precipitação (quantidade, intensidade e frequência);
- Tipo de solo e formação geológica;
- Cobertura do solo (vegetação, rochas aparentes e outros);
- Uso do solo (práticas de cultivo, pastagens, exploração de florestas, atividades de construção e medidas de conservação);
- Topografia (geomorfologia);
- Natureza da rede de drenagem (densidade, declividade, forma, tamanho e conformação dos canais);
- Escoamento superficial;
- Características dos sedimentos (granulométricas e mineralógicas);
- Hidráulica dos canais.

A segunda etapa no ciclo hidrossedimentológico é o transporte dos sedimentos que podem ocorrer rolamento, saltação ou suspensão. Após a erosão os sedimentos podem ser transportados pelos cursos d'água enquanto o gradiente hidráulico for capaz de manter as partículas em movimento (SANTOS, 2015). A variação no tipo de transporte nesta etapa nos corpos d'água depende do peso, tamanho e forma dos sedimentos (CARVALHO, 2008).

A etapa em que o sedimento restabelece o contato com o leito do rio é descrito como sedimentação, processo em que acontece a parada total da partícula que estava sendo transportada pelo corpo d'água. A sedimentação possui importância significativa no estudo dos assoreamentos de reservatórios, pois a construção da barragem altera a dinâmica hidráulica da bacia hidrográfica e favorece a deposição de partículas nestes reservatórios (DURAES, 2013).

Carvalho *et al.* (2000) descreve o termo descarga sólida que pode ser em suspensão e do leito e se refere à quantidade de movimento, ambas são medidas separadamente e são utilizadas para avaliação da dinâmica dos sedimentos nos rios. A velocidade da corrente define o movimento das partículas em suspensão, encontram-se em maior quantidade partículas finas, como argilas e siltes. A descarga sólida de leito é composta por sedimentos

mais grossos que são transportados em baixas velocidades, partículas como pedregulho deixam de se mover e se depositam no leito do rio. A soma das parcelas dos sedimentos transportados em suspensão e de leito é chamada de descarga sólida total.

Na maioria dos dados de sedimentos disponíveis de rios, existem apenas medições de sedimentos suspensos e falta a medida de sedimento de leito. Entretanto, é geralmente aceito que a medida de carga de sedimentos suspensos representa cerca de 90% do total do fluxo de sedimentos, portanto é improvável que a falta da medida do sedimento de leito resulte em grandes incertezas. Em alguns países, como o Brasil, os programas de monitoramento são baseados na coleta de amostras de sedimentos em suspensão infrequentes ao longo de um período de muitos anos, a fim de estabelecer uma concentração ou descarga pode ser utilizado os valores de vazão para estimar o valor médio anual para o período de registro (WALLING; FANG, 2003).

## 2.2 EROSÃO E TÉCNICAS DE CONTROLE

A erosão do solo é um problema ambiental que gera diversos impactos negativos e está diretamente relacionado a fatores como à ocupação do solo para práticas agropecuárias e florestais. Dentre estes impactos, a diminuição da capacidade produtiva tem sido largamente reconhecida em função da redução da porosidade do solo e consequente aumento do escoamento superficial. Este escoamento superficial gera impacto significativo no transporte de sedimentos, o que resulta em assoreamento dos rios (DURÃES; MELLO, 2016).

Barison *et. al* (2009), afirma que a erosão pode ser provocada por processos naturais ou através de ações do homem, erosão antrópica. A primeira ocorre em ambientes em que fatores naturais são responsáveis pelo seu equilíbrio e mudanças climáticas podem gerar modificações através da alteração da velocidade e da intensidade do processo. A erosão influenciada pela ação humana é fortemente alterada através da aceleração de seus processos, por isto é conhecida como “erosão acelerada”. Os autores citam ainda que Fendrich *et al.* (1997) apresenta os fatores condicionantes para os processos de erosão classificados pelos fatores de influência conforme apresentados na Quadro 1:

Quadro 1 - Fatores condicionantes dos processos erosivos.

Fator	Contribuição ao processo erosivo
HOMEM	Retirada da cobertura vegetal. Agricultura praticada com manejo impróprio. Formação de pastos com alta densidade de animais, ocasionando pisoteio excessivo. Abertura de valetas de forma inadequada (perpendicular às curvas de nível), a fim de proteger culturas. Abertura de estradas sem obras de drenagem. Execução de loteamentos sem obras de drenagem e controle de erosão.
CHUVA	Desagregação da estrutura do solo desnudo, pelo impacto das gotas de chuva. Desagregação do solo superficial, pelo escoamento superficial direto. Desagregação do subsolo e do desmonte de maciços, pelo escoamento subterrâneo. Capacidade transportadora da chuva, sobre o solo desagregado. Capacidade transportadora do escoamento superficial, sobre o solo desagregado. Capacidade de provocar o deslizamento e quedas de maciços arenosos no pé dos taludes. Parcela de escoamento superficial excedente, isto é, desconsiderando a parte que infiltra no solo, atua com intensidade no terreno durante alguns minutos e também ao longo dos períodos de chuva. Parcela do escoamento subterrâneo é menos intensiva sobre o solo, porém, atua continuamente ao longo dos períodos de seca.
SOLO	Os solos mais propícios à formação de voçorocas são: Do tipo arenoso, secos e ácidos, pouco coesivos, coluviais e porosos, apresentando o horizonte A constituídos por areia muito fina, siltosa e pouca argila. Solos jovens e/ou rasos com acúmulo de argila iluvial no horizonte B. Solos com camadas de impedimento à drenagem até 1,0 metro da superfície (presença de litoplântitas, duripans ou qualquer outra camada de impedimento).
TOPOGRAFIA	As voçorocas ocorrem tanto em terrenos levemente ondulados, como naqueles de topografia acidentada. A topografia influi na sua velocidade de formação e desenvolvimento os locais que apresentam maior densidade de drenagem, dada pela quantidade de talvegues, sulcos, valetas.
CLIMA	Com base no índice de Classificação Internacional de Climas de KÖEPPEN, as regiões mais atingidas pela erosão são caracterizadas pelas classes de clima úmido, tropical quente e temperado, (Cwa e Aw) e Cfa, com inverno seco e verão chuvoso, respectivamente.

Fonte: Barison; Inês; Alvarenga, (2009).

Barison *et al*(2009) citam Kirby (1980) para descrever que o tamanho da gota da chuva, velocidade e forma, duração e espalhamento da mesma são fatores que impactam na fortemente nos processos erosivos. Estes processos ocorrem em dois estágios bem definidos, o destacamento e o transporte da partícula do solo. O primeiro estágio ocorre pelo impacto

físico entre a gota da chuva e a partícula, o transporte é realizado através do escoamento superficial. A erosão pode ser classificada quanto ao tipo de fluxo de água (YAMANOUTH, 2003):

- Erosão laminar: também conhecida como erosão em lençol, ocorre quando o fluxo é difuso na superfície do solo e o escoamento da água não se concentra em canais definidos.
- Erosão linear: também conhecida como erosão em sulcos, caracteriza-se quando o fluxo é concentrado, formando incisões no solo em forma de filetes ou canais, carregando material inconsolidado, dando origem às feições erosivas como ravinas e voçorocas.

No processo erosivo pela água da chuva, destacam-se duas ações fundamentais (BARISON; INÊS; ALVARENGA, 2009):

- Erosividade da chuva: representa o maior ou menor potencial que uma determinada chuva tem de erodir o terreno. A capacidade da chuva em causar erosão do solo é atribuída à intensidade e ao tamanho das gotas de chuva, o que determina a energia da chuva.
- Erodibilidade do solo: mostra a resistência que um solo apresenta contra a erosão. É a capacidade com que o mesmo se deixa erodir, em função da composição física de sua mistura. O solo poderá ser menos ou mais erodível, dependendo da sua estabilidade de agregados estruturais em resistir mais ou menos ao seu desgaste pela ação das águas, quer pelo impacto, pelo escoamento superficial, quer pelo escoamento subterrâneo.

Como mencionado, o problema da erosão foi agravado pelo rápido crescimento da população e ocupação inadequada e, portanto, seu controle e prevenção dependem do adequado planejamento de desenvolvimento urbano, como por exemplo, a limitação e restrição no uso da terra, fator que pode envolver assuntos de caráter político ou jurídico, tanto quanto dependentes de critérios técnicos. Em áreas susceptíveis à erosão, é sugerido adotar as seguintes medidas de prevenção (BARISON; INÊS; ALVARENGA, 2009):

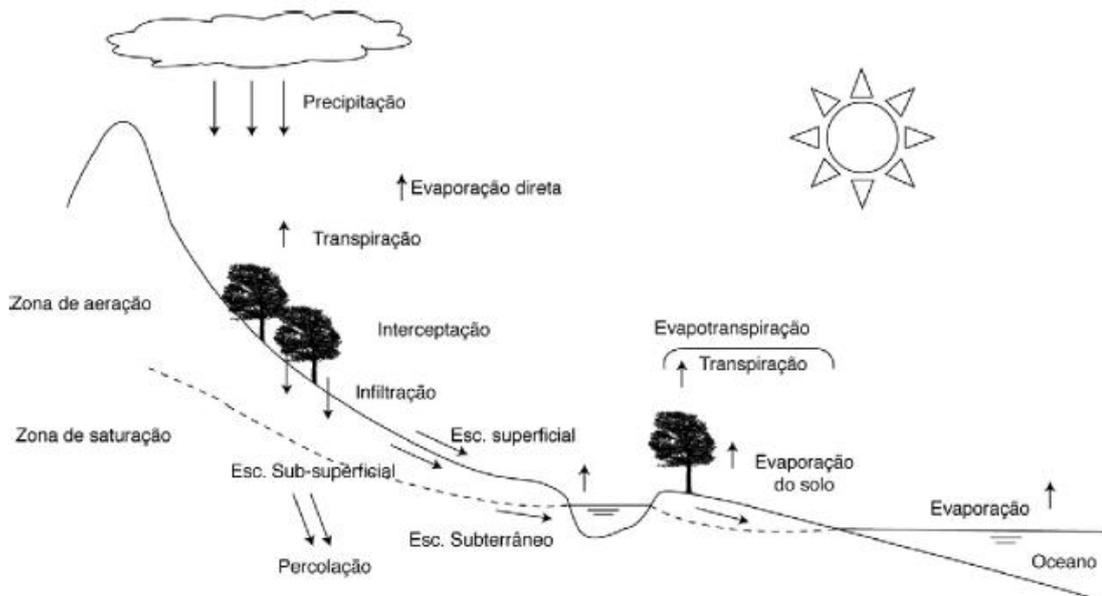
- Evitar a remoção da vegetação nativa, sempre que possível.
- Evitar revolvimento extensivo do solo.
- Instalar sistema de drenagem para evitar um aumento do escoamento superficial.

- Manter as velocidades de fluxo de água baixas.
- Proteger as áreas destituídas de vegetação.
- Construir sistema de drenagem e bermas para interceptar águas de taludes íngremes e das áreas destituídas de vegetação.
- Construir bacias de sedimentação para prevenir que o solo desagregado se movimente para fora da área.

### 2.3 ÁGUAS SUPERFICIAIS

A quantidade de água disponível no planeta se mantém constante ao longo do tempo e fenômeno global da circulação da mesma entre a atmosfera terrestre e a superfície é chamado de ciclo hidrológico, que são impulsionados por fatores como a energia solar, a rotação da terra e a gravidade. O conhecimento dos fatores que interferem no ciclo hidrológico é fundamental para avaliar a dinâmica dos escoamentos superficiais (SILVA; CALHEIROS, 2009). O ciclo hidrológico é composto pelos principais processos apresentados na Figura 1:

Figura 1 - Principais componentes do Ciclo Hidrológico



Fonte: Silva; Calheiros, (2009)

A descrição do ciclo hidrológico pode ser descrita inicialmente com a evaporação da água das superfícies líquidas e do solo com a incidência da energia solar. Logo após, esta água evaporada junto com a transpiração das plantas se concentra na atmosfera e formam as nuvens após um processo de resfriamento, depois a precipitação cujas formas principais são a chuva e a neve. Durante a precipitação, uma parcela da água pode evaporar antes de chegar à superfície, e outra quando são interceptadas por vegetação ou áreas impermeáveis. A água que chega ao solo e não passa pelo processo de evaporação, iniciará o processo de infiltração até atingir a capacidade do solo de saturação. A fase seguinte é o início do escoamento superficial, que irá gerar um fluxo de água que irá criar os rios, que são responsáveis pela condução da água para os lagos e oceanos. Estes rios são alimentados nos períodos de estiagem, por uma parcela de água que infiltrou através do escoamento subterrâneo. A evaporação direta dos solos somada a água que é liberada pelas plantas através da transpiração, formam a evapotranspiração. Desta forma os processos são reiniciados e considerados como um ciclo fechado, entretanto regionalmente podem ocorrer mudanças na disponibilidade de água, devido a mudanças nos diferentes processos.

Para a maioria das atividades humanas ligadas à água, os processos do ciclo hidrológico são analisados na escala da bacia hidrográfica, que é definida como a área natural de captação da água proveniente da precipitação, onde os escoamentos são direcionados para um único ponto de saída chamado exutório (SILVA; CALHEIROS, 2009).

## 2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A DINÂMICA DOS SEDIMENTOS FLUVIAIS

Dados contemporâneos sobre a carga de sedimentos de rios fornecem evidências claras de mudanças recentes significativas nos fluxos de sedimentos de vários rios em resposta ao impacto humano. A influência da ação antropogênica na produção de sedimentos iniciou há aproximadamente 3000 anos, mas se intensificou a mais de 1000 anos. No século XVI, a engenharia alterava bruscamente os ambientes da sociedade. Com o desenvolvimento da mecanização no início do século XX houve um aumento significativo no fluxo de sedimentos na maioria dos grandes rios. A partir de 1950, os impactos referentes à dinâmica dos sedimentos atingiram muitos rios devido à proliferação de barragens (SYVITSKI; KETTNER, 2011).

Pesquisas realizadas sobre os grandes rios mundiais (por exemplo, Rio Mississippi, Rio Yangtzé, Rio Amarelo) mostram que a carga de sedimentos mudou significativamente em resposta às mudanças climáticas, construções de engenharia hidráulica (reservatórios e

barragens) e mudanças no uso da terra. (MEADE; MOODY, 2009; XU; MILLIMAN, 2009; YUE *et al.*, 2014)

Nas últimas décadas, tanto os estudiosos quanto os governos direcionaram considerável atenção ao problema dos sedimentos. Em 2003, a UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, criou a Iniciativa Internacional de Sedimentos (ISI) com objetivo de melhorar a conscientização sobre os problemas de sedimentação e erosão. O relatório publicado pela ISI em 2011 descreve uma visão geral dos problemas dos sedimentos, suas causas e seus impactos, onde a sedimentação em reservatórios é citada como a preocupação mais urgente referente ao gerenciamento relacionado aos rios e que tem o potencial de causar impactos tanto a montante como a jusante destes empreendimentos.

Desta forma, os problemas podem ser classificados conforme a mudança do regime dos sedimentos devido à construção de reservatórios e os impactos das cargas excessivas em geral (UNESCO/ISI, 2011):

#### **2.4.1. Os efeitos negativos a montante da sedimentação do reservatório**

- **Perda da capacidade de armazenamento do reservatório:** o impacto fundamental da sedimentação do reservatório é uma redução na vida útil do reservatório. A perda de capacidade dos reservatórios é um dos principais impactos causados pela deposição em reservatórios, prejudicando o atendimento da demanda hídrica dos seus múltiplos usuários e a geração de energia (CARVALHO, 2008).

A projeção e operação de reservatórios dimensionados para preenchimento com sedimentos foram práticas aceitas que geram os benefícios do armazenamento por um período finito de tempo. As consequências da sedimentação são deixadas para o futuro, entretanto este "futuro" já chegou para muitos reservatórios existentes e outros acabarão experimentando um destino semelhante, impondo custos substanciais à sociedade (PALMIERI; SHAH; DINAR, 2001).

No item 2.5, uma avaliação do assoreamento nos reservatórios é apresentada com informações como a ocorrências deste problema no Brasil e a importância do estudo do assunto.

- **Efeitos dos sedimentos em operações hidrelétricas e operações de reservatórios:** a sedimentação nos reservatórios pode resultar em custos significativos para operações das hidrelétricas. A ocorrência de um acúmulo alto de sedimentos pode gerar entupimento das saídas do reservatório, abrasão de máquinas hidráulicas que possibilitam a diminuição de sua eficiência e o aumento dos custos de manutenção. Para minimizar estes impactos a utilização de dragagem é utilizada para remover o excesso de sedimentos e permitir um fluxo total de água, entretanto é uma solução de engenharia que apresenta alto custo.

#### **2.4.2. Os efeitos negativos a jusante da sedimentação do reservatório resultante da degradação do leito ou deficiência de sedimentos**

Os efeitos gerados a jusante da localização dos reservatórios estão associados à escassez de sedimentos que geram sérios impactos para o equilíbrio fluvial e para o meio ambiente.

- **Dano aos ecossistemas de zonas úmidas, inundáveis e estuários dependentes de sedimentos:** A construção de barragens e reservatórios altera o fluxo natural dos rios o que gera uma diminuição do fluxo sedimentar. Sendo assim, impedem que as zonas úmidas, inundáveis e estuários recebam sedimentos e nutrientes que geram o desaparecimento das mesmas. As inundações periódicas de recarga de sedimentos são prejudicadas, assim como, o transporte de sedimentos e nutrientes associados a desempenhar um importante papel na nutrição de ecossistemas naturais e terras agrícolas.
- **Impactos na infraestrutura:** A falta de recarga de sedimentos a jusante dos rios pode gerar uma erosão aceleradas em torno das estruturas e nas margens dos rios.

#### **2.4.3 Acúmulo excessivo de sedimentos nos leitos e ambientes dos rios**

Os problemas do acúmulo excessivo de sedimentos nos leitos e ambientes dos rios podem ser descritos conforme segue:

- **Inundações:** O acúmulo de sedimentos através da deposição nos sistemas fluviais pode aumentar o nível do leito do rio e, conseqüentemente, os níveis da água. Este acontecimento pode gerar impactos significativos nos processos fluviais e nas inundações. Estas inundações ocorrem quando os rios não conseguem transmitir a quantidade de água que flui a jusante.
- **Problemas de navegação:** A elevação dos leitos dos rios através da sedimentação pode prejudicar a navegação.
- **Impactos nas zonas úmidas e nos ecossistemas internos:** Estes impactos ocorrem em regiões próximas de áreas agrícolas em que a mudança do uso do solo aumentou a taxa de perda do solo e a carga de sedimentos à jusante. Este aumento da sedimentação nas zonas úmidas pode gerar impactos ao meio ambiente e, algumas vezes, sufocar completamente estas áreas resultando em uma diversidade biológica limitada.
- **Impactos na infraestrutura:** O excesso de sedimentos a jusante pode gerar prejuízo ao funcionamento das injeções de casas de bombas de irrigação e gerar impactos negativos como a interrupção nas atividades agrícolas. A manutenção destes sistemas possui custo elevado para os usuários desse abastecimento. Pode ser necessário, ainda, o uso de dragagem para remoção dos sedimentos excedentes. Estes sedimentos podem prejudicar o produto da área agrícola atingida. Outro tipo de infraestrutura que pode ser prejudicada pelo excesso de sedimentos são as estações de tratamento de água domésticas, a população pode sofrer os efeitos na saúde.
- **Impacto dos sedimentos na qualidade da água (turbidez e poluentes):** O sedimento é considerado um poluente por gerar turbidez na água, o que impede a penetração da luz e o crescimento das plantas no leito do rio. Os impactos são agravados, quando o sedimento está contaminado por fertilizantes agrícolas, pesticidas e resíduos industriais que podem gerar um risco grande a saúde humana e a saúde dos ecossistemas circundantes.

## 2.5 AVALIAÇÃO DO ASSOREAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

Carvalho (2000) afirma que todos os reservatórios irão sofrer assoreamento, no caso dos pequenos reservatórios, este processo pode ser rápido e acontecer com uma enchente e nos grandes o tempo pode ultrapassar 1000 anos. Quando os depósitos de sedimentos começam a influenciar na operação regular do reservatório, pode-se afirmar que a o mesmo atingiu o final da sua vida útil. O objetivo determinado para cada reservatório é que define o método de avaliação do assoreamento:

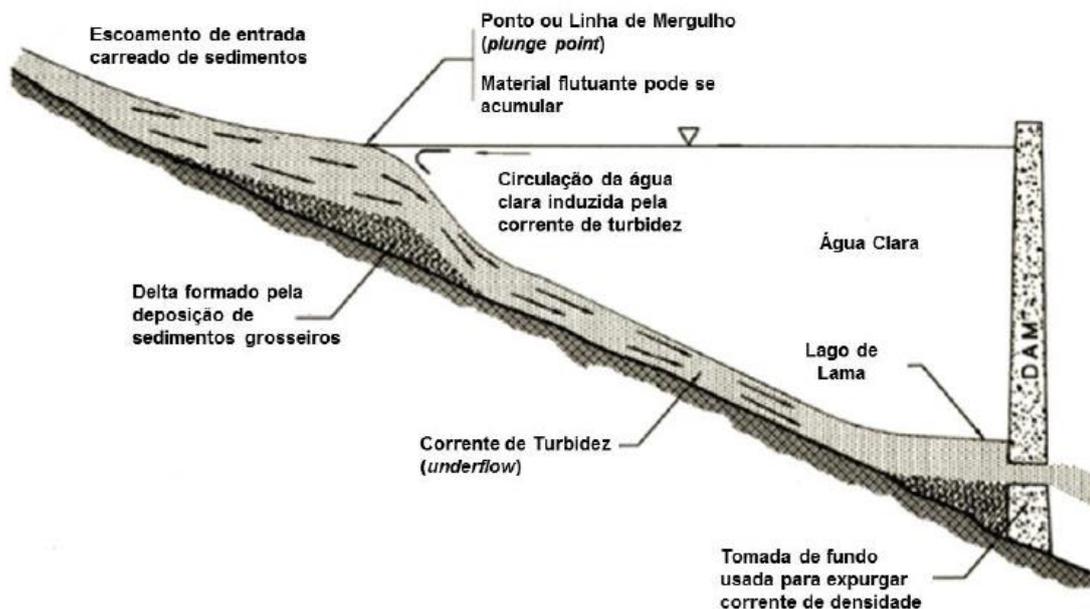
- Fase de inventário: estimativas da vida útil e o do tempo de assoreamento total, auxiliam a definição de ações para melhoria das estimativas econômicas em caso de problemas;
- Fase de viabilidade e projeto básico: verificação dos efeitos dos sedimentos e ações preventivas de controle para os sedimentos;
- Fase de operação: monitoramento sedimentométrico, para implementação de ações preventivas ou corretivas.

Para realização de um estudo do assoreamento de um reservatório é necessário (CARVALHO *et al.*, 2000):

- Levantamento das condições de erosão da bacia (uso do solo e desmatamentos);
- Levantamento de postos sedimentométricos existentes ou desativados;
- Estudos existentes sobre o tema para a bacia;
- Coleta de dados hidrológicos e sedimentológicos necessários (série de vazões, descarga sólida, granulometria do sedimento em suspensão e do leito).

A perda de capacidade dos reservatórios é um dos principais impactos causados pela deposição em reservatórios, prejudicando o atendimento da demanda hídrica dos seus múltiplos usuários e a geração de energia (CARVALHO, 2008). Quando a velocidade do fluxo d'água é reduzida nos reservatórios é criado um ponto de mergulho dos sedimentos (Figura 2), gerando a formação do Delta pela deposição dos sedimentos grosseiros.

Figura 2 - Formação Típica do Delta



Fonte: Santos, (2015)

## 2.6 GEOESTATÍSTICA

Os métodos de interpolação tradicionais são amplamente utilizados quando os dados são abundantes e produzem resultados semelhantes. Krige (1951), concluiu que a distância entre os registros do fenômeno em estudo deveria ser levada em consideração enquanto trabalhava com dados de concentração de ouro. Assim surgiu o conceito da geoestatística, que considera a localização geográfica e a dependência espacial para o estudo de dados de um determinado fenômeno. A técnica desenvolvida por Krige empiricamente recebeu posteriormente um tratamento formal por Matheron (1971), que desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas. Estas variáveis são funções numéricas que não podem ser representadas por funções matemáticas simples, possuem distribuição espacial e apresentam uma continuidade aparente na variação entre os pontos.

Esta teoria pressupõe que a variação de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes: a) estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; b) aleatória, espacialmente correlacionada; e c) um ruído aleatório ou erro residual. Se  $x$  representa uma posição em uma, duas ou três dimensões, então o valor da variável  $Z$ , em  $x$ , é dada por conforme Equação (1), (Burrough, 2015).

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon'' \quad (1)$$

Sendo:  $m(x)$  é uma função determinística que descreve a componente estrutural de  $Z$  em  $x$ ;

$\varepsilon'(x)$  é um termo estocástico, que varia localmente e depende espacialmente de  $m(x)$ ;

$\varepsilon''$  é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal com média zero e variância  $\sigma^2$ .

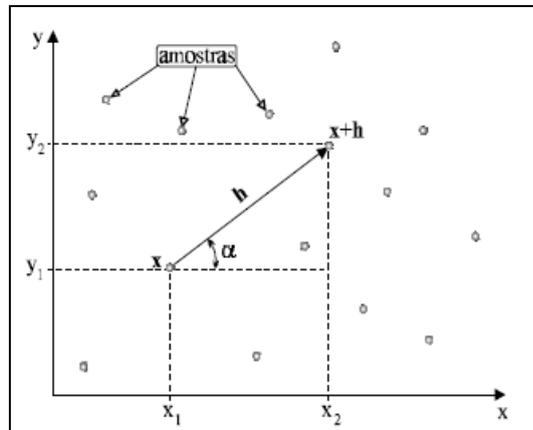
A geoestatística é um processo de duas etapas para o estudo do comportamento das variáveis regionalizadas composto pelas ferramentas fundamentais chamadas: semivariograma e krigagem. O primeiro é o cálculo do semivariograma e a montagem de um modelo, que descreve a relação espacial entre os pontos de dados. Este é talvez o passo mais importante no processo de krigagem (LANDIM, 2006; PAWAR, 2003). A correlação espacial entre as observações e a previsão dos valores de atributos nos locais que não foram amostrados pode ser estudada através da Krigagem.

A geração de modelos (imagens) da distribuição espacial dos atributos da variável estudada permite a tomada de decisões quando combinados com conhecimentos especializados, pois são consistentes com as informações disponíveis (GOOVAERTS, 1999). Áreas como a hidrologia, engenharia de petróleo e mineração utilizam estas ferramentas para diversas aplicações em vários campos para caracterizar meios espacialmente.

### 2.6.1 Variogramas

O Variograma é a ferramenta utilizada para definir a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. Os pontos  $X$  e  $Y$  ilustrados na Figura 3 representam o mesmo atributo medido em posições diferentes (teor de zinco, por exemplo), onde  $X = Z(x)$  e  $Y = Z(x+h)$ .

Figura 3 - Amostragem em duas dimensões.



Fonte: Landim; Yamamoto, (2013)

A Equação (2) define o Variograma  $2\gamma(\mathbf{h})$ , que representa o nível de dependência entre as duas variáveis, X e Y.

$$2\gamma(\mathbf{h}) = E\{[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})]^2\} = \text{Var}[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] \quad (2)$$

Através de uma amostra  $z(x_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , o variograma pode ser estimado conforme Equação (3):

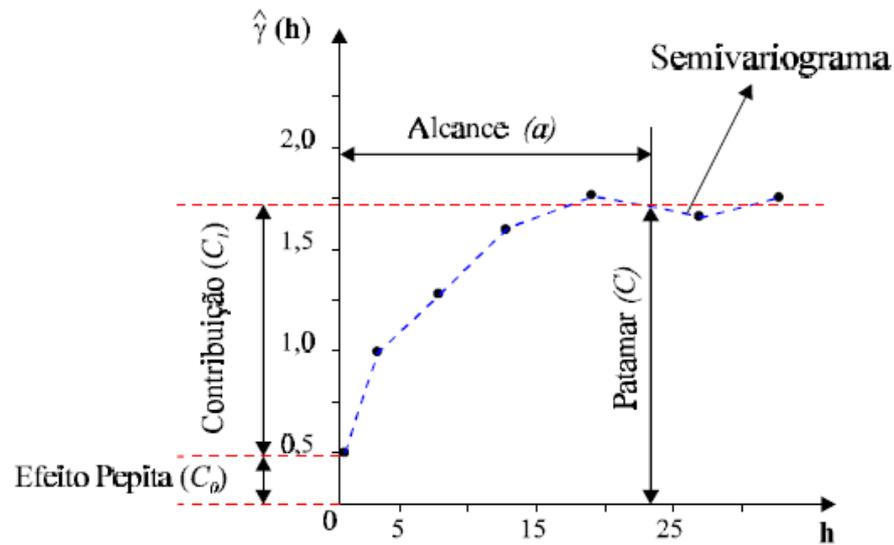
$$2\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [z(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})]^2 \quad (3)$$

onde:

- $2\gamma(\mathbf{h})$  - é o variograma estimado;
- $N(\mathbf{h})$  - é o número de pares de valores medidos,  $z(\mathbf{x}_i)$  e  $z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})$ , separados por um vetor distância  $\mathbf{h}$ ;
- $z(\mathbf{x}_i)$  e  $z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})$ , - são valores da  $i$ -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $\mathbf{x}_i$  e  $\mathbf{x}_i + \mathbf{h}$  ( $i = 1, \dots, n$ ), separados pelo vetor  $\mathbf{h}$ .

O modelo de um semivariograma experimental ideal é ilustrado na Figura 4, onde as diferenças  $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$  decresçam à medida que  $h$ , a distância que os separa decresce. Normalmente, espera-se que os dados localizados mais próximos apresentem valores mais semelhantes entre si do que as que estão mais distantes umas das outras. Desta maneira, é esperado que  $\gamma(\mathbf{h})$  aumente com a distância  $\mathbf{h}$ .

Figura 4 - Exemplo de semivariograma

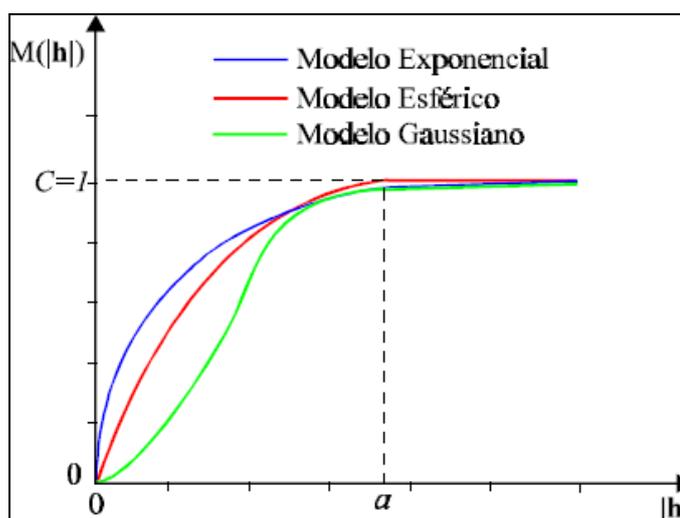


Fonte: Landim; Yamamoto, (2013)

O gráfico do semivariograma experimental, calculado através da Equação (3), é formado por uma série de valores, conforme ilustra a Figura 4, sobre os quais se objetiva ajustar uma função. O procedimento de ajuste não é direto e automático, como no caso de uma regressão, por exemplo, mas sim interativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico.

Os modelos aqui apresentados são considerados modelos básicos, denominados de modelos isotrópicos por Isaaks e Srivastava (1989). Estão divididos em dois tipos: modelos com patamar e modelos sem patamar. Modelos do primeiro tipo são referenciados na geoestatística como modelos transitivos. Os modelos transitivos mais utilizados são: modelo esférico (Sph), modelo exponencial (Exp) e modelo gaussiano (Gau). Estes modelos estão apresentados na Figura 5 com o mesmo alcance

Figura 5 - Representação gráfica de modelos transitivos normalizados.



Fonte: Landim; Yamamoto, (2013)

### 2.6.2 Krigagem

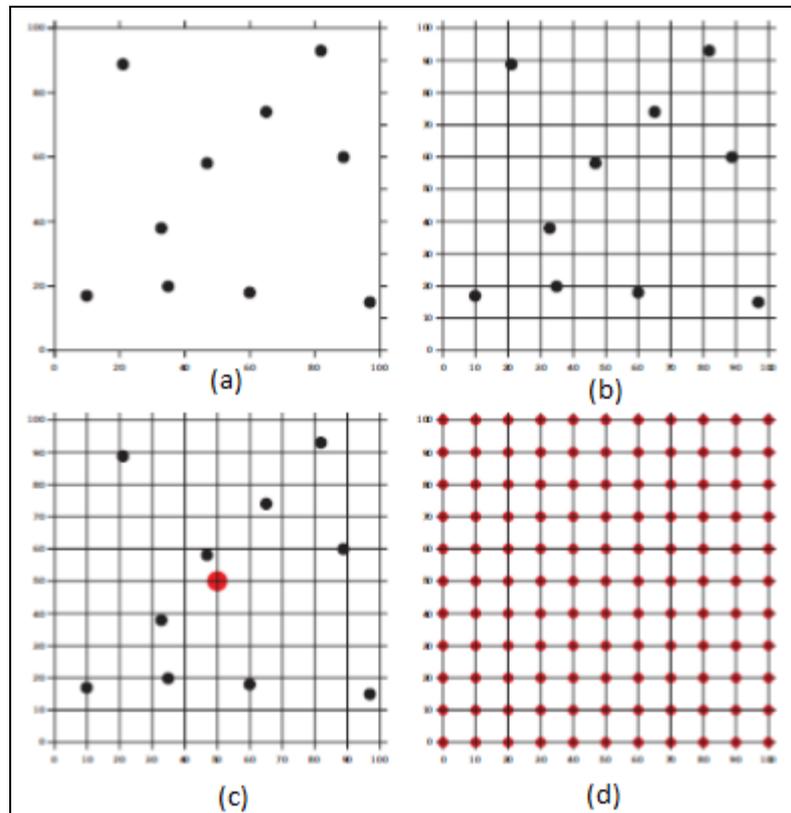
O nome *Krigagem* é um nome genérico adotado por geostatísticos, para uma família de algoritmos de regressão de mínimos quadrados generalizados (GOOVAERTS, 1999). Este método considera a autocorrelação de variáveis regionalizadas que possuem uma certa continuidade espacial e permite a estimação de valores da variável em locais desconhecidos a partir de dados obtidos por amostragem.

Este método de interpolação é utilizado para estimação de um valor de uma variável regionalizada de um atributo localizada em um campo geométrico, considerando todos os valores amostrados. O princípio define que os valores de pontos próximos no espaço são mais parecidos que os mais afastados, ou seja, existe uma correlação espacial entre os dados pertencentes a população amostrada (LANDIM, 2006). Desta forma, é muito provável que se em uma bacia hidrográfica a concentração de sedimentos em suspensão num ponto  $p$  é  $x$ , os resultados encontrados serão muito próximos de  $x$  o quanto mais próximos de  $p$ ., entretanto, a correlação espacial pode deixar de existir a uma determinada distância de  $p$ , segundo os princípios da Geoestatística.

A krigagem é um método que se inicia com um conjunto de dados conhecidos e distribuídos de forma irregular no espaço (Figura 7-a), onde procura-se construir uma rede regular com estes pontos através da interpolação como apresentado na Figura 7-b. O ponto

vermelho na Figura 6-c representa a estimativa do valor do atributo no ponto de coordenadas e na Figura 6-d observa-se todos os valores estimados para a rede regular.

Figura 6 - (a) Conjunto de dados amostrados; (b) rede regular superposta; (c) estimativa do valor desconhecido no ponto de coordenadas em vermelho e (d) estimativa dos pontos da rede regular



Fonte: Ladim (2006)

Segundo Isaaks e Srivastava, (1989), a Krigagem Ordinária é geralmente associada com o acrônimo B.L.U.E. “Best Linear Unbiased Estimator”, que implica no melhor estimador linear e imparcial. É “linear” porque suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados disponíveis; é “imparcial”, uma vez que tenta ter a média ou o erro, igual a zero; é “melhor” porque visa minimizar, a variação dos erros. A diferença entre os demais métodos de estimativas é que eles também são lineares, teoricamente imparciais, mas apenas a krigagem ordinária visa minimizar a variação do erro.

Landim (2006) afirma que a krigagem pode ser usada como algoritmo estimador conforme segue:

a) previsão do valor pontual de uma variável regionalizada em um determinado local dentro do campo geométrico; é um procedimento de interpolação exato que leva em consideração todos os valores observados, o qual pode ser a base para cartografia automática

por computador quando se dispõe de valores de uma variável regionalizada dispostos por uma determinada área;

b) cálculo médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico como, por exemplo, no cálculo do teor médio de uma jazida a partir de informações obtidas de testemunhas de sondagens;

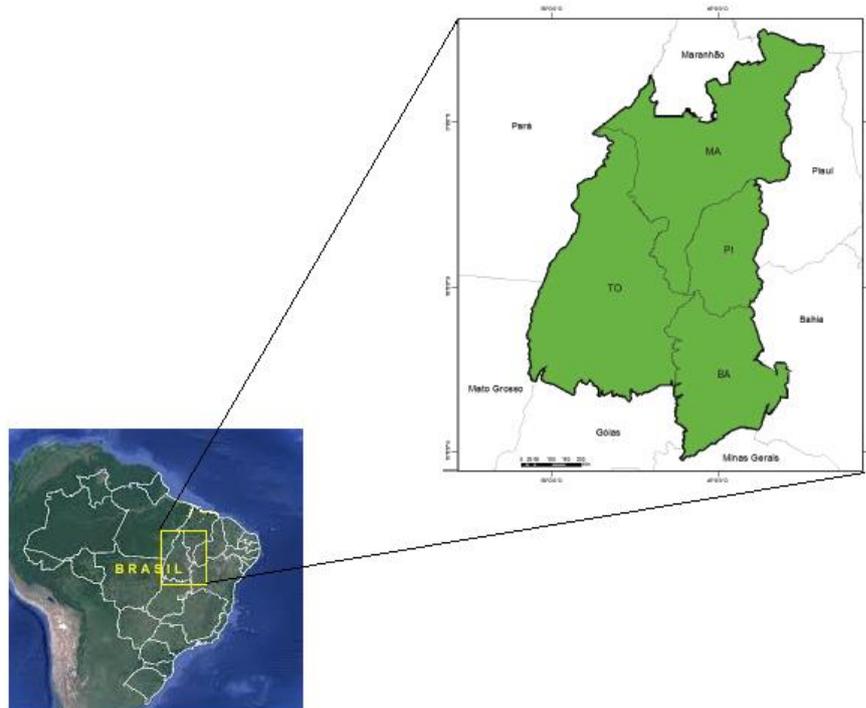
Na krigagem ordinária, utilizamos um modelo de probabilidade em que a polarização e a variância de erro podem ser calculadas e, em seguida, escolha pesos para as amostras próximas que assegurem que o erro médio para nosso modelo seja exatamente zero e que nossa variância de erro modelada seja minimizada (Isaaks e Srivastava, 1989).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região conhecida como MATOPIBA, um acrônimo criado com as iniciais dos estados do **M**aranhão, **T**ocantins, **P**iauí e **B**ahia. Atualmente é uma importante fronteira agrícola, com uma área aproximada de 73 milhões de hectares que abrange todo o estado de Tocantins e parte dos outros estados (Figura 7). Diversas transformações socioeconômicas aconteceram nas duas últimas décadas com o surgimento da expansão da fronteira agrícola baseada em tecnologias de alta produtividade (MIRANDA; MAGALHÃES; CARVALHO, 2014). Este região tem mostrado uma evolução de destaque no cenário agrícola nacional, em 2010 produziu 2,3 milhões de toneladas de grãos, enquanto que em 2015/2016 somente a produção de soja foi igual a 7,6 milhões de toneladas (EVANGELISTA *et al.*, 2017). No período entre 1990 a 2010 houve um crescimento de aproximadamente 400% referente a área plantada de algodão, milho e soja, que era de 543.292 ha e aumentou para 2.718.807ha.

Figura 7 – Localização da região do MATOPIBA

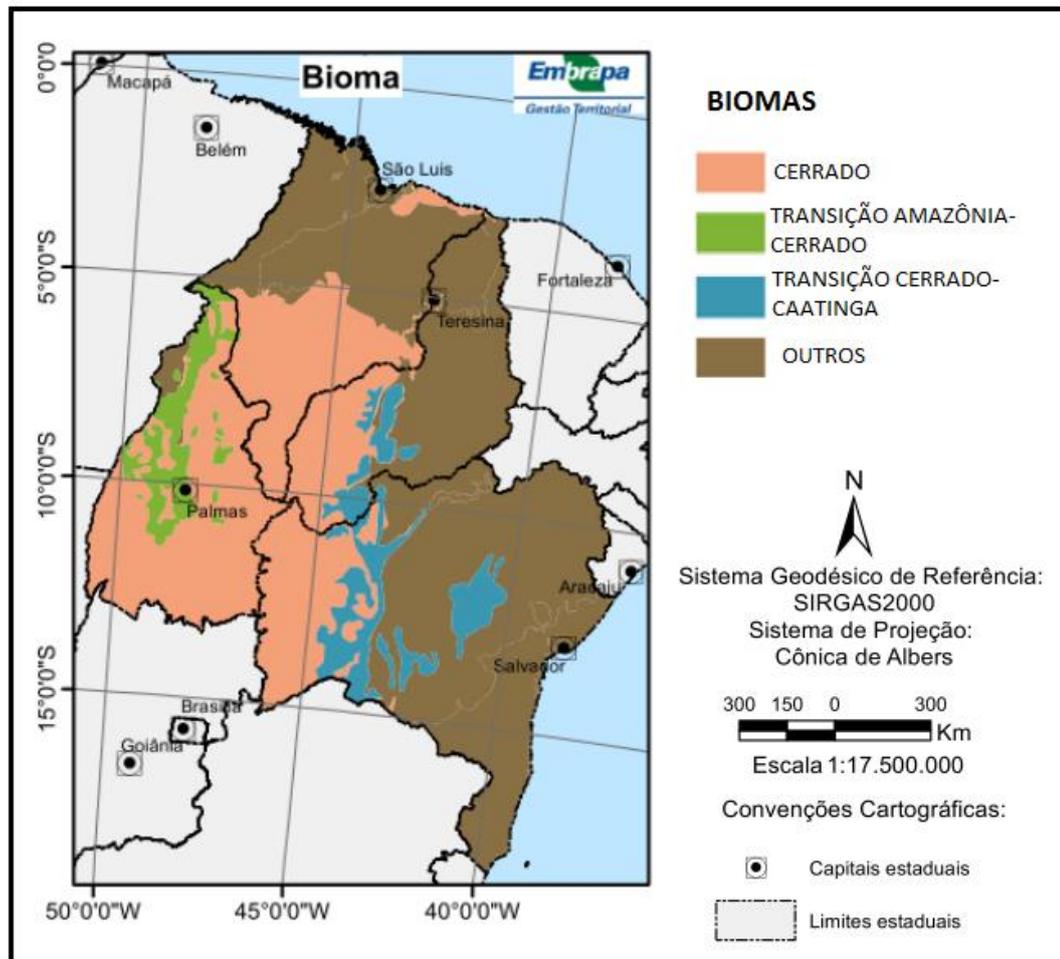


Fonte: Modificado de Evangelista *et al.*, (2017)

Este crescimento vertiginoso do MATOPIBA pode ser associado a fatores como a topografia plana, os solos profundos e o clima favorável ao cultivo de grãos e fibras. Como etapa preliminar, informações sobre as características do ambiente que mais influenciam na erosão e na geração de sedimentos foram levantadas e organizadas, relativas ao bioma, clima, hidrografia, relevo, pedologia, uso e cobertura do solo.

Em seus aspectos gerais, a região apresenta cerca de 94% da sua área pertencente ao bioma cerrado (savana), o restante abrange parte do bioma da Caatinga no Leste e Amazônia no Noroeste conforme Figura 8.

Figura 8 – Característica predominantes do bioma na região do MATOPIBA

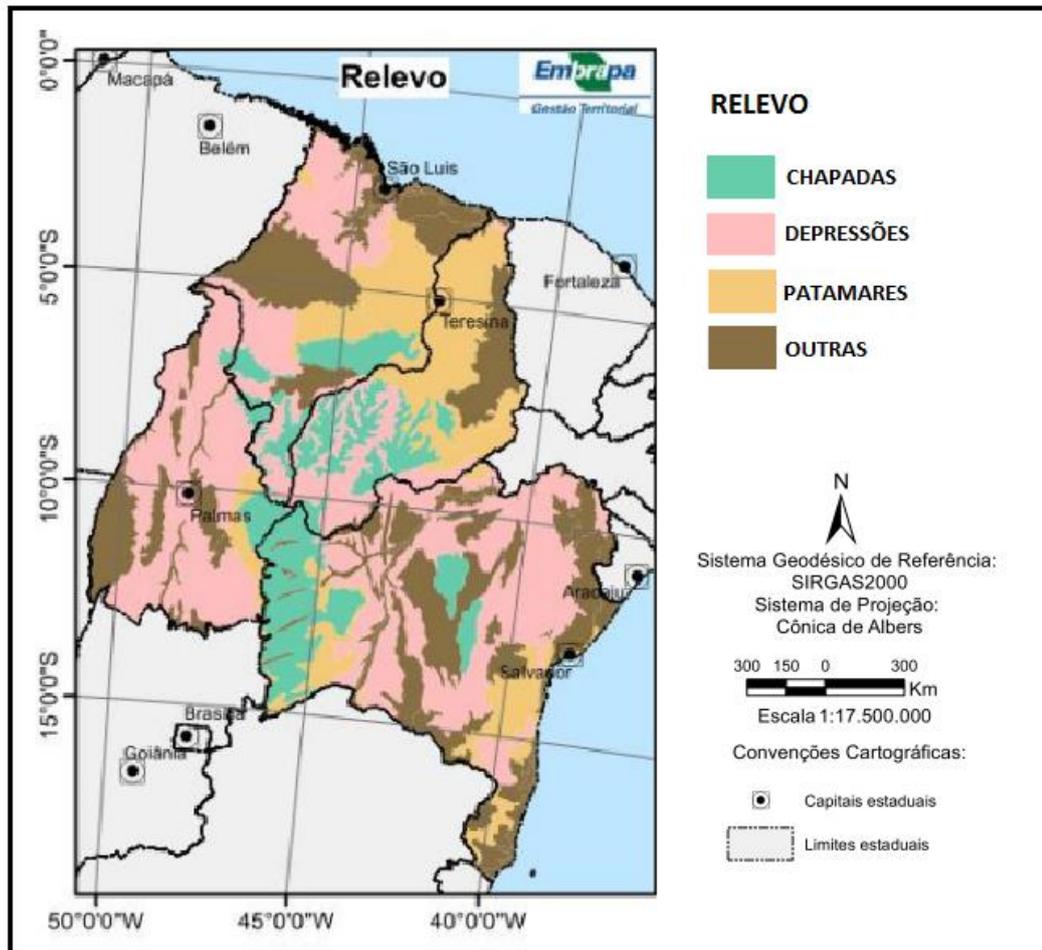


Fonte: Adaptado de Mingoti; Holler; Spadotto, (2014)

O relevo da região do MATOPIBA é um dos fatores que favorecem o uso agrícola através da facilidade de mecanização do cultivo e ao menor risco de erosão, que é motivo de precauções devido à ocorrência na região de solos de textura arenosa e arenoso-média. A

predominância do relevo é composta por Chapadas (49%), Depressões (34%) e Patamares (8%) conforme apresentado na Figura 9.

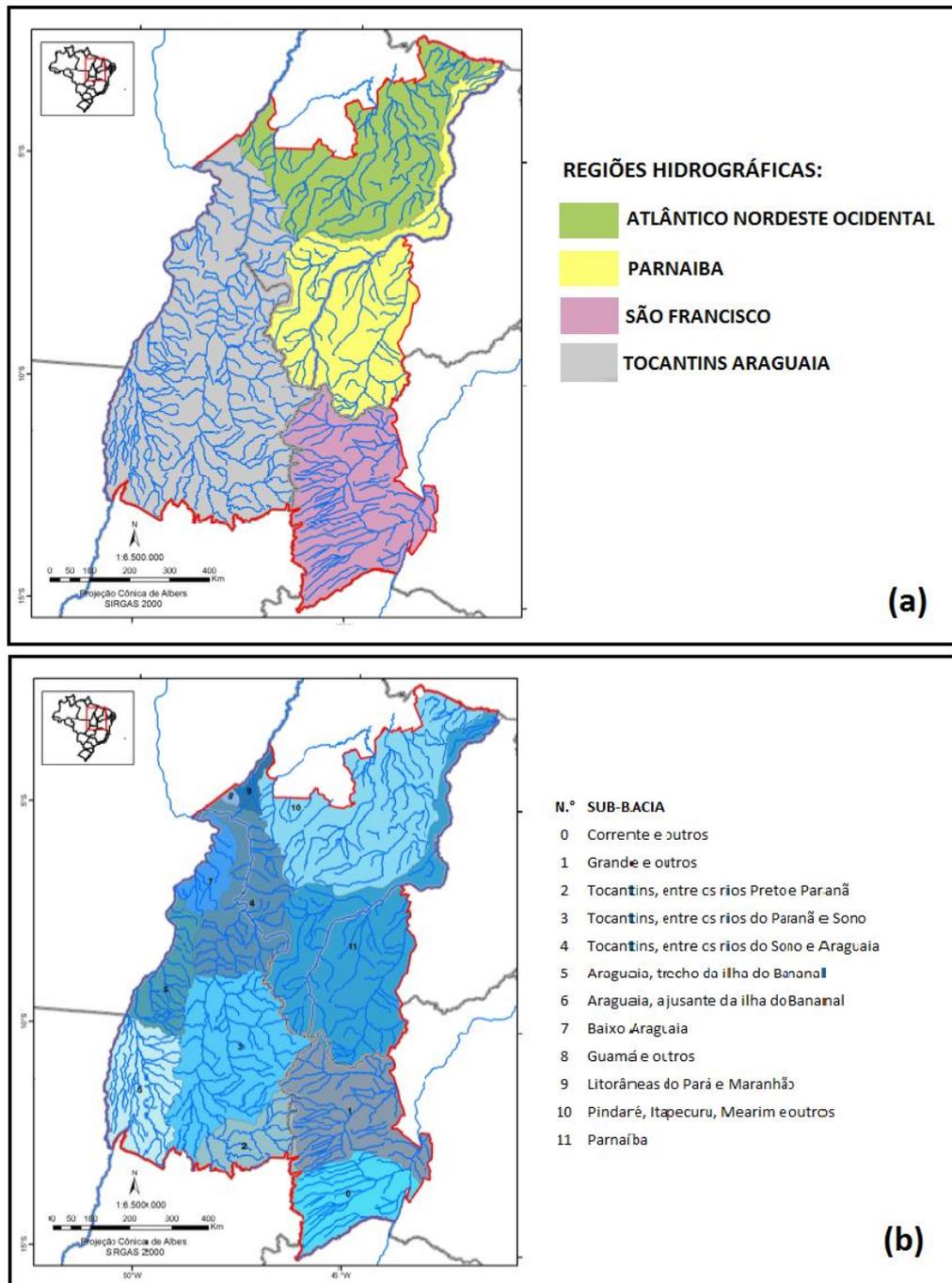
Figura 9 - Característica predominantes do relevo na região do MATOPIBA



Fonte: Adaptado de Mingoti; Holler; Spadotto, (2014)

O MATOPIBA é formado por três bacias hidrográficas (Figura 10(a)): Tocantins-Araguaia, com 43% da área; São Francisco, com 17% da área e Atlântico (trecho Norte-nordeste) com 40%. As sub-bacias inseridas nos limites territoriais do MATOPIBA estão representadas na Figura 10 (b) e os principais cursos d'água são: Araguaia, Tocantins, Parnaíba, São Francisco, Mearim, Itapicuru, Pindaré e Gurupi.

Figura 10 – (a) Regiões hidrográficas e (b) Mapa das sub-bacias e rede de drenagem do MATOPIBA

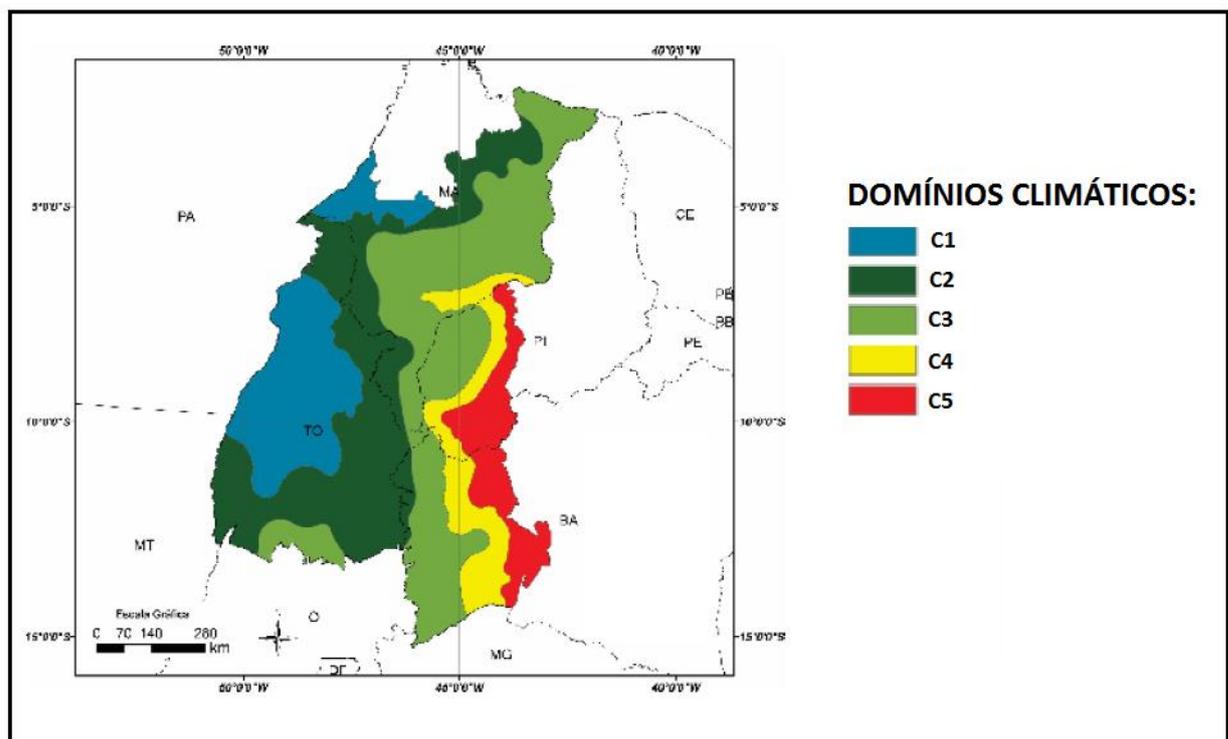


Fonte: Adaptado de Magalhães; Miranda, (2014)

O clima na região do MATOPIBA é classificado como tropical seco, que é caracterizado pelas temperaturas superiores a 18°C em todos os meses do ano, consideradas elevadas. Em relação à pluviometria regional, a região apresenta duas estações bem definidas:

um seca (maio à setembro) e outra chuvosa (outubro à abril) com precipitação média entre 800 e 2.000 mm. Na Figura 11, a área do MATOPIBA está subdividida em cinco domínios climáticos identificadas de C1 a C5, conforme estudo realizado por (LUMBRERAS *et al.*, 2015). As regiões C1 e C2 apresentam os maiores valores de precipitações, em níveis superiores a 1.300 mm, com períodos de estiagem mais curtos e índices de umidades positivos, estão relacionados às porções territoriais vizinhas ao Bioma Amazônia. O domínio C3 representa a região com precipitação média entre 1.100 e 1.300 mm. Os climas C4 e C5 distinguem-se por apresentar deficiência hídrica acentuada, estas regiões localizam-se em áreas pertencentes ao domínio das caatingas e florestas caducifólias intermediárias para caatinga, típica do ambiente semiárido, com chuvas anuais podendo chegar a totais próximos a 600 mm.

Figura 11 – Distribuição dos domínios climáticos na região do MATOPIBA

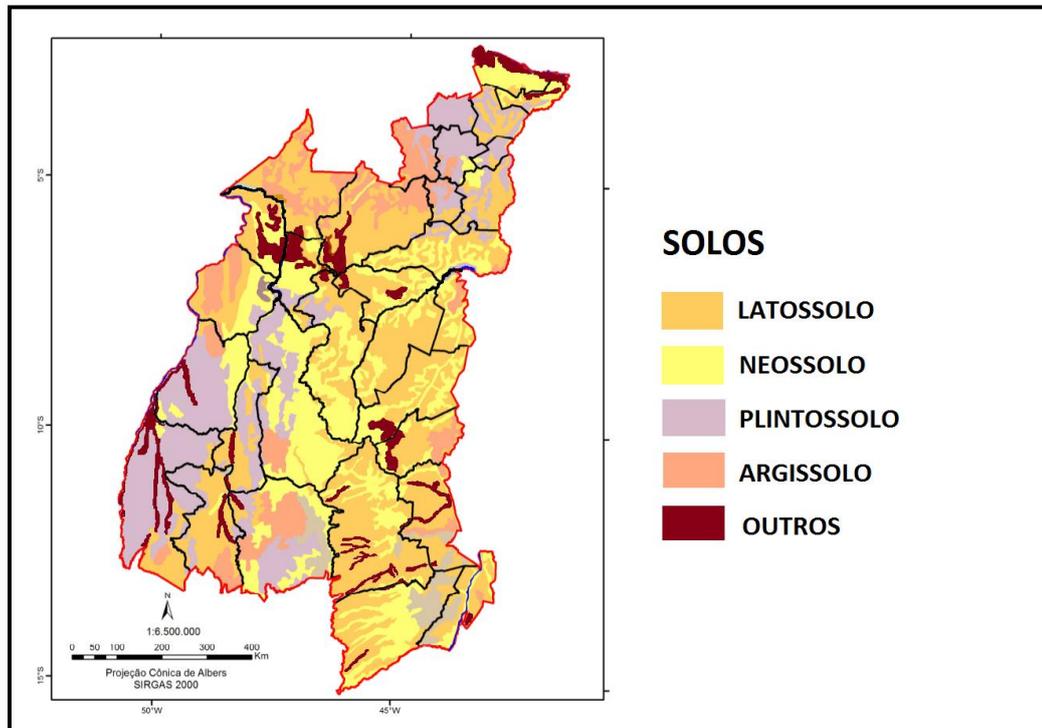


Fonte: Adaptado de Lumbreras *et al.*, (2015)

Os tipos de solos verificados na região são variados e estão representados na Figura 12, predominando em posição relativa mais elevada os Latossolos (com superfície estimada em 38%), os Neossolos (25%), os Plintossolos (20%) e os Argissolos (10%) (MAGALHÃES; MIRANDA, 2014). Os solos de textura leve (de classe textural areia, areia franca e francoarenosa) são muito frequentes na área do MATOPIBA, destaca-se que estes solos

apresentam elevada vulnerabilidade à degradação, o que favorece a erosão e produção de sedimentos.

Figura 12 – Características predominantes de Solos na região do MATOPIBA.



Fonte: Adaptado de Mingoti; Holler; Spadotto, (2014)

As quatro primeiras classes de solos que predominam na região do MATOPIBA representam 92% da área total e possuem as seguintes características (LUMBRERAS *et al.*, 2015):

#### ***Latossolos Amarelos, Vermelhos e Vermelho-Amarelos***

Os Latossolos compreendem solos minerais em avançado estado de intemperização, apresentam baixa suscetibilidade à erosão e condições favoráveis às atividades motomecanizadas (Figura 13). No caso dos solos de textura leve, o baixo nível de fertilidade natural, baixa capacidade de água disponível e elevada taxa de infiltração são as principais restrições ao uso agrícola. Os Latossolos de textura média leve são bastante estáveis, embora sejam mais suscetíveis à erosão em função da baixa coesão de suas partículas. O manejo inadequado e o trânsito de máquinas pesadas podem gerar a degradação. Este é o tipo de solo predominante na região e é bastante utilizado para a produção agrícola tecnificada nas chapadas do oeste da Bahia, sudoeste do Piauí, sul do Maranhão e centro-sul do Tocantins.

Figura 13 - Perfil de Latossolo Vermelho situado próximo a Porto Nacional (TO).



Fonte: Lumbreras *et al.*, (2015)

#### ***Neossolos Quartzarênicos Órticos e Hidromórficos***

Os Neossolos ocupam o segundo lugar na predominância na região do MATOPIBA, com aproximadamente 25% de ocupação da área total. Nesta classe estão compreendidos solos pouco desenvolvidos, constituído por material mineral de textura arenosa, que atinge até 1,5 m de profundidade (Figura 14). São solos muito suscetíveis aos processos erosivos, mesmo em locais de baixa declividade, que requerem ações preventivas para limitar sua degradação. Além desta característica outros fatores contribuem com as restrições para uso agrícola como o baixo nível de fertilidade natural e baixa capacidade de água disponível.

Figura 14 - Perfil de Neossolo Quartzarênico Órtico típico, situado próximo a Gilbués (PI).



Fonte: Lumbreras *et al.*, (2015)

### ***Plintossolos Pétricos, Argiluvicos e Hápticos***

Os Plintossolos são muito frequentes na região do MATOPIBA, nos estados do Maranhão e do Tocantins a ocorrência é mais expressiva e apresentam fortes restrições de drenagem e/ou com presença de elevada quantidade de petroplintita no tamanho de cascalhos ou calhaus, que constituem severas limitações para a mecanização (Figura 15). A erosão constitui outra limitação dos Plintossolos quando ocorrem locais declivosos. A pastagem é o principal uso agrícola para estes solos com problema de profundidade efetiva física e são bastante utilizados para o cultivo de arroz de inundação.

Figura 15 - Perfil de Plintossolo Pétrico, situado próximo a Lagoa da Confusão (TO).



Fonte: Lumbreras *et al.*, (2015)

### ***Argissolos Amarelos, Vermelhos, Vermelho-Amarelos e Acinzentado***

Estes solos apresentam maior suscetibilidade à erosão em função do gradiente textural apresentar um conteúdo mais elevado de argila, o que propicia a redução da infiltração e o deflúvio superficial é aumentado (Figura 16).

Figura 16 - Área fortemente erodida, com ocorrência de argissolos vermelhos (Gilbués, PI).



Fonte: Lumbreras *et al.*, (2015)

O MATOPIBA apresenta um dinamismo crescente de desenvolvimento associado ao uso e ocupação das terras, a região incorporou de forma definitiva a produção agrícola em seu meio rural e se consolida como um importante fronteira agrícola.

As áreas do MATOPIBA, principalmente em Tocantins e Maranhão, são utilizadas predominantemente com pastagens. Entretanto a expansão agrícola se intensificou na região, destacam-se o cultivo de soja, milho, algodão, arroz e feijão. BOLFE *et al.* (2017) analisaram a mudança do uso da terra de 2000 à 2012 e definiram os principais processos dessa dinâmica de conversão, foi evidenciado que 53% do bioma Cerrado havia sido desmatado até 2010.

No período de 2000 a 2010 houve um aumento de 1,7Mha de áreas agrícolas, oriundas de pastagem natural, área igual a 1,58 Mha e em menor escala de outras fontes. Entre 2010 e 2012, o aumento foi de 1,3 Mha de áreas agrícolas, onde 1,2 Mha foram oriundas de pastagens naturais. Segundo IBGE (2015), as áreas de pastagens naturais são ocupadas por vegetação campestre (natural) sujeita a pastoreio e interferências antrópicas da baixa intensidade.

A expansão agrícola na região do MATOPIBA ocorreu tanto sobre áreas antropizadas como em novas áreas. Entre 2010 e 2014 foram mapeados 1,26 Mha de novas áreas agrícolas, 30% foram estabelecidas em locais antropizados entre 2009 e 2014 e 48% antes de 2002. Os estados de Tocantins e Bahia apresentaram os maiores percentuais de terras abertas antes de 2002, utilizaram 50% e 65% respectivamente. No período entre 2000 e 2014 a área agrícola do MATOPIBA cresceu no Maranhão 3,2 vezes, no Tocantins, no Piauí e na Bahia o aumento foi 8,7; 11,5 e 3,2 vezes, respectivamente (IBGE, 2016).

### 3.2 LEVANTAMENTO DOS MAPAS TEMÁTICOS RELACIONADOS AO PROCESSO EROSION

O estudo da sedimentação fluvial está relacionado diretamente aos fatores que influenciam a erosão, ou seja, o processo de geração dos sedimentos. O levantamento dos mapas temáticos relacionados ao processo de erosão foi realizado com objetivo de cruzar os dados para uma análise da dinâmica dos processos que impactam os resultados de descarga sólida fluvial na região do MATOPIBA.

O conhecimento das informações referentes ao bioma, ao relevo, a hidrografia, ao clima, aos solos e ao uso da terra são fundamentais para realização da análise espacial e temporal dos processos hidrossedimentológicos. Os mapas do bioma, do relevo e do clima foram analisados a partir de revisão bibliográfica, em trabalhos publicados sobre o MATOPIBA (BOLFE *et al.*, 2017; DONAGEMMA *et al.*, 2016; EVANGELISTA *et al.*, 2017; LUMBRERAS *et al.*, 2015). O levantamento dos mapas temáticos da hidrografia, solos e uso da terra foi realizado através de pesquisas nas principais bases de dados brasileiras em

formatos georeferenciados próprios para estudos em ambientes de geoprocessamento, o mapa de hidrografia foi adquirido no banco de dados “HidroWeb” da Agência Nacional de Águas e os mapas relacionados ao solo, elementos de relevo e uso e cobertura da terra na base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Estes mapas foram analisados e elaborados no ArcGIS<sup>R</sup> com objetivo de organizar e gerar mapas especializados com as informações pertinentes aos objetivos deste trabalho.

Para a elaboração dos mapas de uso da terra foram utilizados os arquivos georeferenciados e disponibilizados pelo IBGE para os anos 2000, 2010, 2012 e 2014. Foram selecionados os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia para examinar a dinâmica da mudança do uso da terra na região do MATOPIBA. As classes de cobertura e uso da terra de acordo com o Manual técnico de uso da terra (IBGE, 2013) são descritas no Quadro 2:

Quadro 2 - Classes de cobertura e uso da terra

CLASSES DE COBERTURA E USO DA TERRA	
Áreas Antrópicas Agrícolas	Terra utilizada para a produção de alimentos, fibras e commodities do agronegócio. Inclui todas as terras cultivadas, caracterizadas pelo delineamento de áreas cultivadas ou em descanso, podendo também compreender áreas alagadas. Podem se constituir em zonas agrícolas heterogêneas ou representar extensas áreas de “plantations”
Pastagem Natural	Área ocupada por vegetação campestre (natural) sujeita a pastoreio e outras interferências antrópicas de baixa intensidade.
Pastagem com Manejo	Área predominantemente ocupada por vegetação herbácea cultivada. São locais destinados ao pastoreio do gado e outros animais, formados mediante plantio de forragens perenes, sujeitos a interferências antrópicas de alta intensidade, como limpeza da terra (destocamento e despedramento), calagem e adubação.
Silvicultura	Área caracterizada pelo cultivo de florestas plantadas com espécies exóticas. Nesta classe mais de 75% do polígono deve ser ocupado por silvicultura.
Vegetação Campestre	Mais de 75% do polígono ocupado por formações não-arbóreas (campestres). Entende-se como campestres as diferentes categorias de vegetação fisionomicamente bem diversa da florestal, ou seja, aquelas que se caracterizam por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um tapete gramíneo-lenhoso. Incluem-se nessa categoria as Savanas, Estepes, Savanas Estépicas, Formações Pioneiras e Refúgios Ecológicos. Encontram-se disseminadas por diferentes regiões fitogeográficas, compreendendo diferentes tipologias primárias: estepes planaltinas, campos rupestres das serras costeiras e campos hidroarenosos litorâneos (restinga), conforme o Manual Técnico de Uso da Terra (2013).
Vegetação Florestal	Mais de 75% do polígono ocupado por florestas. Consideram-se florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura, incluindo-se aí as áreas de Floresta Densa (estrutura florestal com cobertura superior contínua), de Floresta Aberta (estrutura florestal com diferentes graus de descontinuidade da cobertura superior, conforme seu tipo com cipó, bambu, palmeira ou sororoca), de Floresta Estacional (estrutura florestal com perda das folhas dos estratos superiores durante a estação desfavorável – seca e frio), além da Floresta Ombrófila Mista (estrutura florestal que compreende a área de distribuição natural da Araucaria angustifolia, elemento marcante nos estratos superiores, que geralmente forma cobertura contínua). Inclui outras feições em razão de seu porte superior a 5 m de altura, como a Savana florestada, Campinarana florestada, Campinarana arborizada e os
Água	Incluem todas as classes de águas interiores e costeiras, como cursos de água e canais (rios, riachos, canais e outros corpos de água lineares), corpos d’água naturalmente fechados, sem movimento (lagos naturais regulados) e reservatórios artificiais (represamentos artificiais d’água construídos para irrigação, controle de enchentes, fornecimento de água e geração de energia elétrica), além das lagoas costeiras ou lagunas, estuários e baías.
Outras Áreas	Estas áreas referem-se tanto a ambientes naturais, como rochas desnudas ou praias, quanto a ambientes antrópicos, decorrentes da degradação provocada pelas atividades humanas, como extração de minerais.

Fonte: IBGE, (2013)

### 3.3 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NOS SISTEMAS FLUVIAIS E NOS RESERVATÓRIOS COM BASE UM MODELO ESPACIAL

#### 3.3.1 Coleta e preparação dos dados

A realização da análise espacial e temporal dos processos hidrossedimentológicos na região do MATOPIBA foi embasada nos valores de descarga sólida em suspensão ( $Q_{ss}$ ). Estes valores foram determinados de forma direta através da aplicação da Equação (4) utilizada nos métodos de IIL e IID – Método de Igual Incremento de Largura ou por Igual Incremento de Descarga (Carvalho, 2008):

$$Q_{ss} = 0,0864.Q.C \quad (4)$$

Em que:

$Q_{ss}$  – descarga sólida em suspensão, t.dia<sup>-1</sup>

0,0864 – fator de transformacao de unidade

$Q$  – descarga líquida m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

$C$  – concentração em mg.L<sup>-1</sup>

No Brasil, a atribuição de promover o gerenciamento e coordenação das atividades no âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional é da Agência Nacional de Águas – ANA, criada em 17 de julho de 2000, dentre outras atribuições ela precisa manter e disponibilizar o cadastro atualizado das estações hidrometeorológicas do País (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2009).

A primeira etapa foi realizada através do levantamento das estações fluviais localizadas na área de estudo que possuem dados de concentração de sedimentos, o período pesquisado foi de 2000 a 2015. Para isto, o software chamado Hidro 1.3 foi utilizado juntamente com o banco de dados composto com as informações descritas da Tabela 1, ambos disponibilizados pela ANA.

Tabela 1 – Informações dos registros do banco de dados Ana.

Registro	Quantidade
Bacias Hidrográficas	9
Bub-bacias Hidrográficas	84
Rios	13.624
Estados	39
Municípios	5.711
Estações de Medições	35.220

Fonte: Autor

As estações fluviométricas selecionadas para este estudo foram referências para a segunda etapa deste levantamento de dados. Os números das estações fluviométricas foram utilizados no site do “Hidroweb” para adquirir as séries históricas de concentração de sedimentos (C) e vazões (Q), verificadas uma a uma. Na Tabela 2, o quantitativo levantado de estações fluviométricas para o ano de 2012 estão representados e apenas 75 possuem dados de concentração de sedimentos.

Tabela 2 - Relação das Sub-bacias e estações com dados sedimentométricos – 2012

BACIA	SUB-BACIA	TOTAL DE ESTAÇÕES	TOTAL/BACIA
ATLÂNTICO - TRECHO NORTE/NORDESTE	33	9	22
	34	13	
RIO SÃO FRANCISCO	45	4	13
	46	9	
TOCANTINS-ARAGUAIA	21	3	40
	22	6	
	23	7	
	24	8	
	25	2	
	26	6	
	27	5	
	28	3	
TOTAL DE ESTAÇÕES COM DADOS DE SEDIMENTOS			75

Fonte: Autor

O Plano de Desenvolvimento da Rede Sedimentométrica elaborado pela ANA(2006) afirma que as estações sedimentométricas administradas pela mesma, realizam a amostragem de sedimentos em suspensão e a determinação da concentração de sedimentos das amostras coletadas. A amostragem é realizada através do método de Igual Incremento de Largura (IIL) ou pelo Método de Igual Incremento de Descarga (IID), assim a concentração definida através das amostras será a concentração média da seção transversal do rio onde foram coletadas. Comenta, ainda, que devido ao desconhecimento dos procedimentos adequados para o correto

monitoramento sedimentométrico ou pelo aprendizado equivocado no passado, optou por não incluir a amostragem de sedimentos do leito e a análise granulométrica de sedimentos em suspensão e do leito. Outra justificativa citada pela ANA foi que conforme reportado na literatura, a descarga de sedimentos em suspensão é predominante em relação à descarga sólida total, a qual pode ser estimada a partir da primeira, utilizando a adição de um valor percentual (geralmente de 10 a 20%).

A frequência de operação das estações sedimentométricas da ANA é trimestral, similar a frequência de operação dos demais tipos de estações (pluviométricas, fluviométricas, telemétricas e de qualidade de água). Os custos envolvidos nos deslocamentos das equipes de hidrometria dificultam a determinação de uma frequência diferenciada para o levantamento destes dados (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2006).

A frequência definida pela ANA é trimestral, entretanto os dados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) disponíveis no banco de dados HidroWeb para as estações fluviométricas selecionadas não acompanham esta definição. Ou seja, existem muitas medições faltantes para o período dos últimos quinze anos.

Durante o levantamento dos dados de concentração de sedimentos, foi evidenciado que a disponibilidade dos mesmos para as regiões do Maranhão, Piauí e Bahia são insuficientes para os objetivos deste trabalho dentro do MATOPIBA. Sendo assim, foi definido que a análise espacial e temporal será direcionada para região do Tocantins.

Para ilustrar este fato, os dados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e descarga líquida (Q) da Bacia Tocantins disponibilizados pela ANA no “HidroWeb” no ano de 2012, são apresentados na Tabela 3. Para esta bacia foram levantados 29 postos fluviométricos com dados sedimentométricos no período chuvoso.

Tabela 3 - Número de dados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e descarga líquida (Q) da Bacia Tocantins, 2012

Ano	Número de Medições C <sub>ss</sub> e Q
2000	40
2001	56
2002	50
2003	44
2004	32
2005	50
2006	23
2007	110
2008	184
2009	160
2010	144
2011	124
2012	200
2013	194
2014	202
2015	127

Fonte: Autor

Chaves and Piau (2008) afirmam que a precipitação é um dos fatores que afetam significativamente o escoamento superficial e o aporte de sedimentos. E ainda, que o escoamento superficial apresenta amplificações significativas em relação a aumentos de precipitação. Em razão da relação entre precipitação e aporte de sedimentos, os dados de concentração de sedimentos foram analisados considerando o período chuvoso da região do MATOPIBA.

Segundo (SALVADOR, 2014), a região do MATOPIBA apresenta uma alta variabilidade anual da precipitação pluviométrica. O período chuvoso inicia no mês de outubro e termina no mês de abril. Os meses de outubro e novembro foram classificados como período de transição. O período seco apresenta-se entre os meses de maio e setembro, sendo maio o mês de transição neste período. Sendo assim, para realização da análise espacial e temporal da descarga sólida em suspensão os períodos para o estudo foram definidos conforme Quadro 3. Os anos de 2010, 2012 e 2014 foram definidos por possibilitarem a comparação com a evolução dos mapas de uso da terra publicados pelo IBGE nos mesmos anos.

Quadro 3 – Definição dos períodos dos dados analisados

Período	Meses	Anos
CHUVOSO	Fevereiro, Março e Abril	2010, 2012 e 2014
SECO	Junho, Julho e Agosto	2010, 2012 e 2014

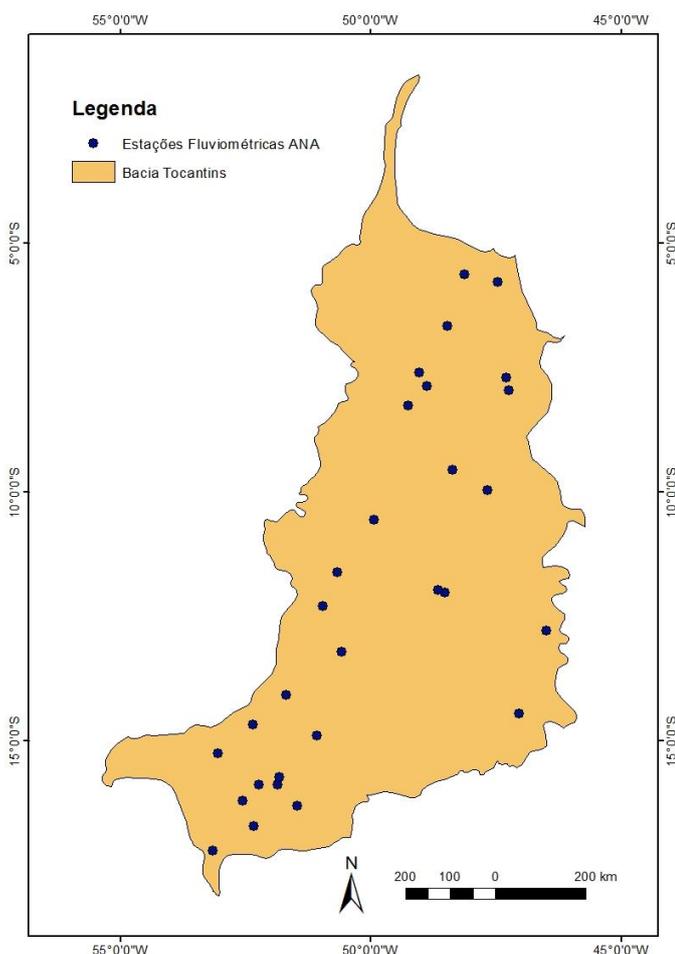
Fonte: Autor

### 3.3.2 Produção de sedimentos e modelo espacial

A espacialização dos dados de descarga sólida em suspensão é uma das etapas fundamentais neste trabalho. Neste processo o software utilizado foi o ArcGIS/GeostatisticalAnalyst<sup>R</sup> versão 10.3, disponível no Laboratório de Informática e Geoprocessamento do Departamento de Engenharia Ambiental da UNESP de São José dos Campos. Inicialmente, os dados adquiridos nas etapas anteriores foram inseridos no ArcGIS através da criação de seis projetos em ambiente SIG:

- Período Chuvoso de 2010;
- Período Chuvoso de 2012;
- Período Chuvoso de 2014;
- Período Seco de 2010;
- Período Seco de 2012;
- Período Seco de 2014;

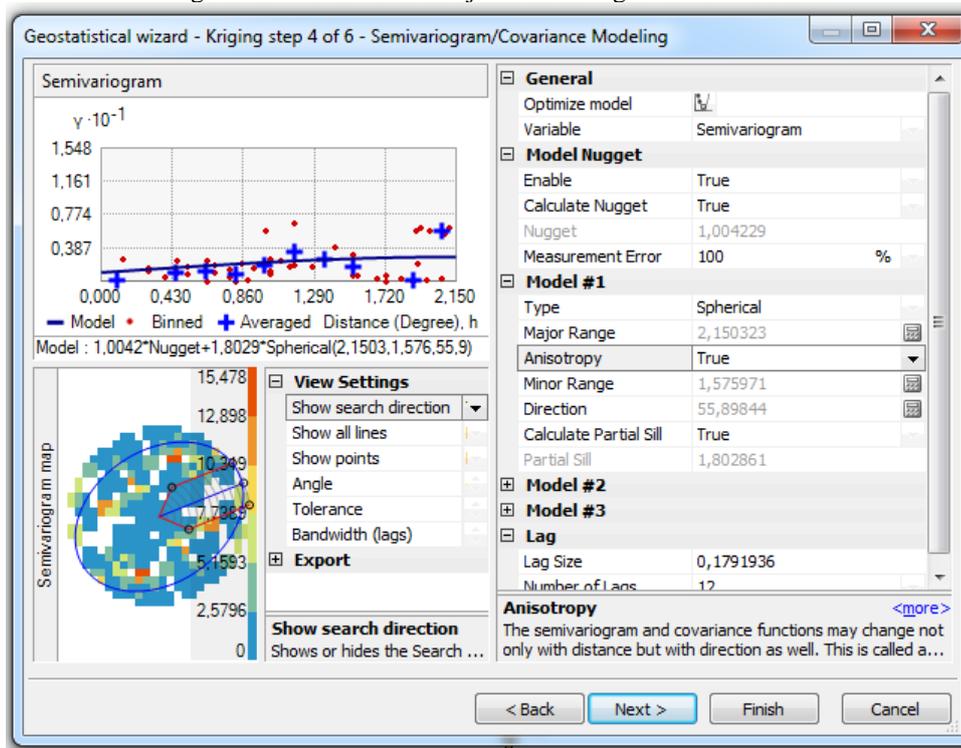
Para elaboração do modelo espacial foi utilizado o método de interpolação Krigagem, disponível no ArcGIS<sup>R</sup>. Esta ferramenta possibilita a transformação dos dados de descarga sólida em suspensão associados aos pontos ilustrados na Figura 17 em superfície contínua.

Figura 17 - Mapa de localização das estações fluviométricas (ArcGIS<sup>R</sup>)

Fonte: Autor

As estações fluviométricas com dados de concentração de sedimentos localizadas na área de estudo apresentam uma distribuição irregular. Desta forma houve a necessidade de se pesquisar qual o melhor ajuste e conseqüente método de interpolação para a adequada modelagem geoestatística dos dados.

Para a interpolação foi utilizado o módulo de “Análise Geoestatística”, iniciando com a análise distribuição do histograma e definição do melhor tipo de distribuição. Para os dados do período chuvoso de 2012, o tipo de transformação mais adequada para a distribuição foi logarítmica. A análise de tendência foi verificada com objetivo de garantir eficácia no ajuste do semivariograma, a função mais adequada para os dados foi a exponencial. Após esta análise, a etapa seguinte foi o ajuste do semivariograma, com a definição do método Krigagem ordinária, logarítmica de segunda ordem. O modelo definido foi o Esférico com anisotropia testada e ajustada no ambiente ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Ferramenta de ajuste do variograma no ArcGIS<sup>R</sup>

Fonte: Autor

Finalmente, foi executada a interpolação por krigagem ordinária, que é um estimador baseado numa série de técnicas de análise de regressão e que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (LANDIM, 2006).

### 3.4 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E A DISTRIBUIÇÃO DAS HIDRELÉTRICAS NA ÁREA DE ESTUDO

Para análise da influencia da produção de sedimentos nas hidrelétricas, foi realizado um levantamento das Usinas Hidrelétricas (UHE) e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) que operam na área de estudo. A relação destas unidades e as localizações georeferenciadas foram levantadas no banco de dados da ANA através do software Hidro 1.3 e estão apresentadas na Tabela 4. Os dados georeferenciados foram transformados em um mapa de localização das UHE e PCH com auxílio do ArcGis. Este mapa foi utilizado no cruzamento das informações para atendimentos dos objetivos definidos neste trabalho.

Tabela 4 – Relação de UHE e PCH localizadas na área de estudo

N.	UHE	Latitude	Longitude
1	PCH AGRO TRAFO	-11,6764	-46,6642
2	PCH ÁGUA LIMPA	-11,6981	-46,7367
3	PCH ÁGUA SUJA	-11,8908	-46,7700
4	PCH ALTO ARAGUAIA	-11,7100	-46,7506
5	PCH AREIA	-13,3736	-46,3842
6	PCH BOA SORTE	-11,9578	-46,7544
7	PCH DIACAL II	-14,6950	-46,2867
8	PCH DIANÓPOLIS	-11,7981	-46,7714
9	PCH DOIDO	-14,3047	-46,2011
10	PCH ESPERANÇA	-11,9503	-46,7556
11	PCH GALHEIROS I	-14,3575	-46,1978
12	PCH LAGEADO	-13,3817	-46,2778
13	PCH LAGOA GRANDE	-12,4686	-46,4433
14	PCH LAJES	-13,4531	-48,1456
15	PCH MAMBAÍ II	-12,9528	-46,3711
16	PCH MOSQUITÃO	-12,6131	-47,7597
17	PCH NOIDORE	-12,8678	-48,2011
18	PCH PIRANHAS	-11,4692	-46,8136
19	PCH PORTO FRANCO	-9,8519	-48,2836
20	PCH PRIMAVERA	-9,3086	-47,9314
21	PCH RÊNIC	-9,7603	-48,3697
22	PCH RIACHÃO	-12,2342	-48,3861
23	PCH RIACHO PRETO	-6,5922	-47,4664
24	PCH SALTO BELO	-13,2300	-48,1928
25	PCH SANTA EDWIGES II	-17,3011	-53,2172
26	PCH SÃO DOMINGOS	-15,7925	-53,1692
27	PCH SOBRADO	-16,5917	-51,8056
28	PCH TAGUATINGA	-16,4750	-51,4167
29	PCH TAMBORIL	-16,2994	-52,7047
30	UHE CANA BRAVA	-16,5364	-51,4794
31	UHE ESTREITO	-14,8569	-53,2919
32	UHE ISAMU IKEDA	-15,3800	-54,4136
33	UHE LUÍS EDUARDO MAGALHÃES	-14,8689	-53,3017
34	UHE MOSQUITO	-14,8569	-53,2919
35	UHE PEIXE ANGICAL	-14,8631	-53,2908
36	UHE SÃO SALVADOR	-14,8689	-53,3017
37	UHE TUCURUÍ RIO ARAGUAIA 1	-6,3997	-48,5281

Fonte: Autor

### 3.5 IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS COM MAIOR POTENCIALIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE NOVAS HIDRELÉTRICAS

A identificação das áreas com maior potencialidade para implantação de novas hidrelétricas foi realizada através da análise dos mapas gerados com o modelo espacial gerado para o ano de 2014. O cruzamento deste mapa com as informações referentes ao bioma, ao relevo, a hidrografia, ao clima, aos solos e, principalmente, ao uso da terra auxiliaram no atendimento deste objetivo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

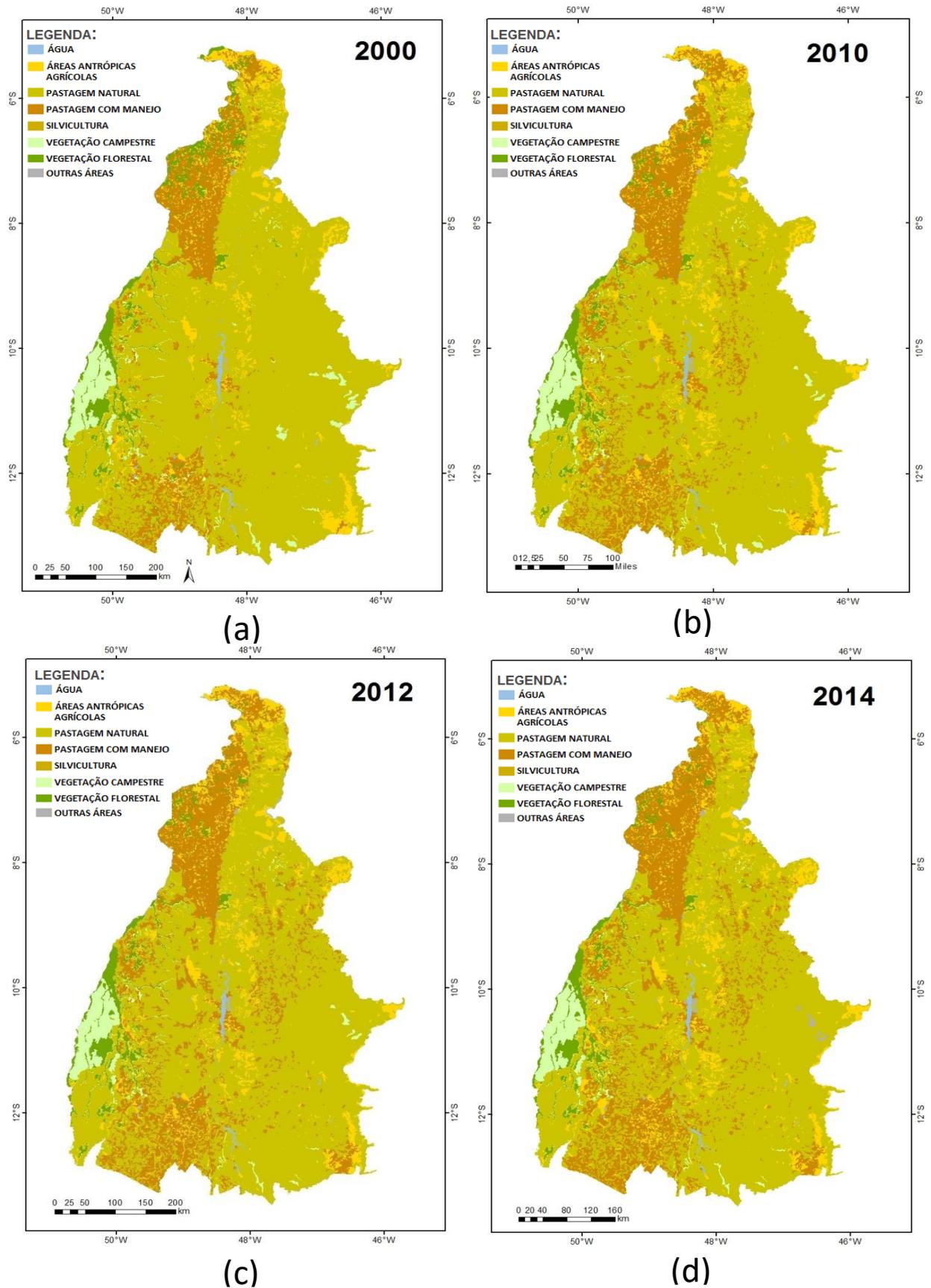
### 4.1 MAPAS TEMÁTICOS RELACIONADOS AO PROCESSO DE EROSIÃO

A análise da variação espacial e temporal da sedimentação fluvial na região do MATOPIBA, inicia-se com os resultados relacionados ao uso da terra que é um dos fatores que influenciam na produção de sedimentos, através dos processos de erosão. O entendimento da dinâmica da mudança do uso da terra é fundamental para o acompanhamento da evolução da produção de sedimentos.

A região do MATOPIBA registrou um aumento das áreas agrícolas igual a 1,7 Mha para o período de 2000 a 2010, enquanto entre 2010 e 2012 o aumento foi de 1,2 Mha. Mha (BOLFE *et al.*, 2017). Ou seja, em dois anos (2010-2012) foi registrado um crescimento igual a 70% da expansão registrada em 10 anos (2000-2010). E ainda, este crescimento aconteceu em sua maioria em áreas antropizadas antes de 2010. Este processo de conversão aconteceu prioritariamente na substituição de pastagens naturais para agricultura de larga escala, favorecida pela mecanização e intensificação da produção com técnicas de manejo mais desenvolvidas. Os mapas de Uso da Terra gerados no ArcGIS para os anos de 2000, 2010, 2012 e 2014 estão ilustrados na Figura 19.

Os mapas de uso da terra ilustrados na Figura 19 apresentam a evolução das áreas situadas no estado de Tocantins entre 2000 e 2014, o a região de expansão agrícola aumento 8,7 vezes. Destaca-se principalmente a mudança das áreas de pastagens naturais para áreas agrícolas e pastagens com manejo. Ou seja, a substituição de áreas classificadas com interferências antrópicas de baixa intensidade para atividades de alta intensidade segundo IBGE (2013).

Figura 19 – Mapas de uso da terra MATOPIBA – Região do estado de Tocantins

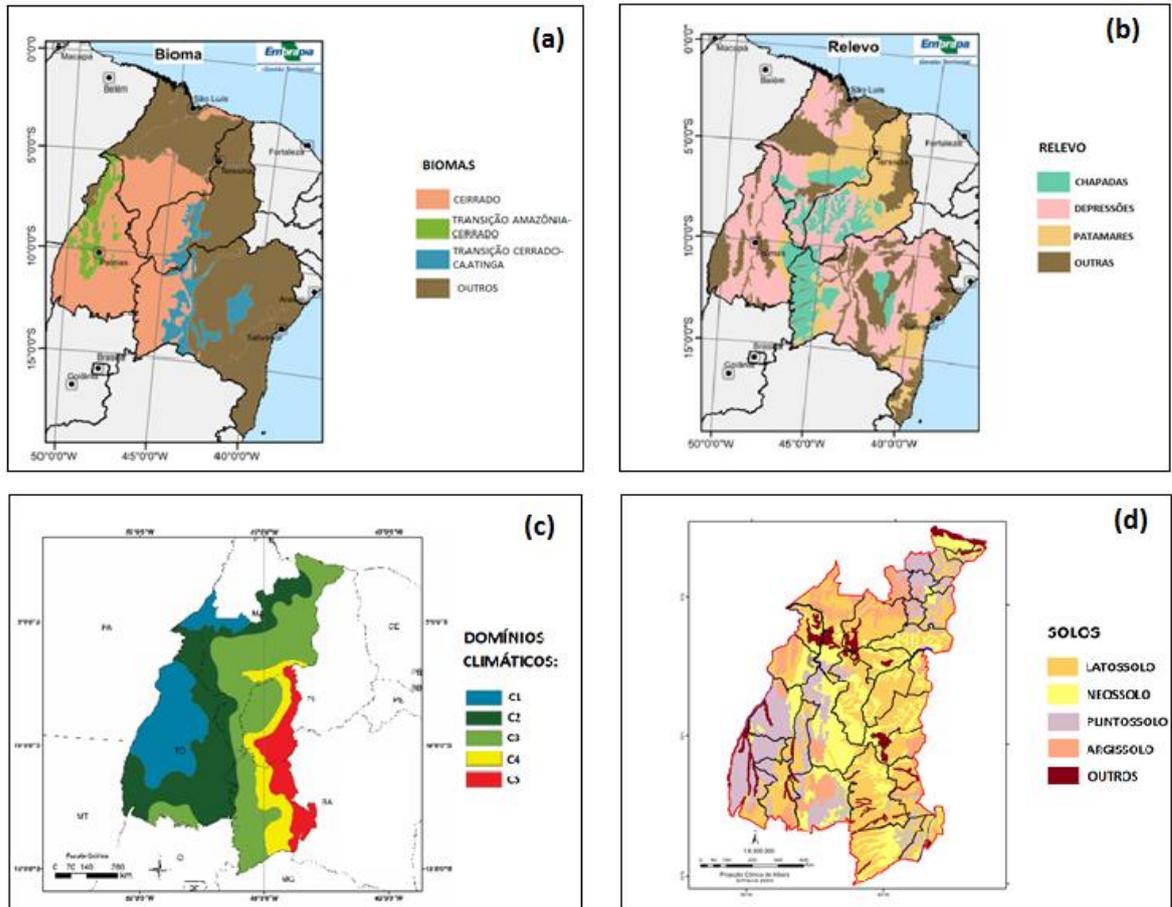


Fonte: Autor adaptado IBGE (2016)

O estado de Tocantins apresentou os maiores percentuais de terras antropizadas até o ano de 2002 para as áreas de expansão agrícola, no período entre 2005-2010 o percentual foi igual a 62% e para 2010-2014 o percentual foi 66%. Este fato mostra que nesta região a expansão agrícola vem ocorrendo predominantemente em áreas previamente antropizadas. As terras da área do MATOPIBA, especialmente no estado do Tocantins, são utilizadas predominantemente como pastagem. Entretanto atualmente há uma grande expansão da agricultura tecnificada na região como culturas de soja, milho, algodão, arroz e feijão (LUMBRERAS *et al.*, 2015).

A região do MATOPIBA situada no estado de Tocantins apresenta uma predominância do bioma cerrado (Figura 20-a). As depressões são o tipo de relevo predominante nestas áreas de estudo, regiões mais planas e regulares as quais possuem as altitudes entre 100 a 500 metros e apresentam intenso acúmulo de sedimentos (Figura 20-b). Os solos leves, que se enquadram nas classes texturais arenosas, o tipo predominante são os Plintossolo e Latossolos (Figura 20-d). Os primeiros são caracterizados pela baixa capacidade de retenção de água e severas limitações para mecanização. A erosão constitui outra limitação dos Plintossolos quando ocorrem locais declivosos. Os latossolos de textura média são bastante estáveis, embora sejam mais suscetíveis à erosão em função da baixa coesão de suas partículas. O manejo inadequado e o trânsito de máquinas pesadas podem gerar a degradação.

Figura 20 – Mapas temáticos: (a) bioma; (b) relevo, (c) clima e (d) solos.



Fonte: Adaptado de Mingoti *et al.*, (2014)

## 4.2 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NOS SISTEMAS FLUVIAIS E NOS RESERVATÓRIOS COM BASE UM MODELO ESPACIAL

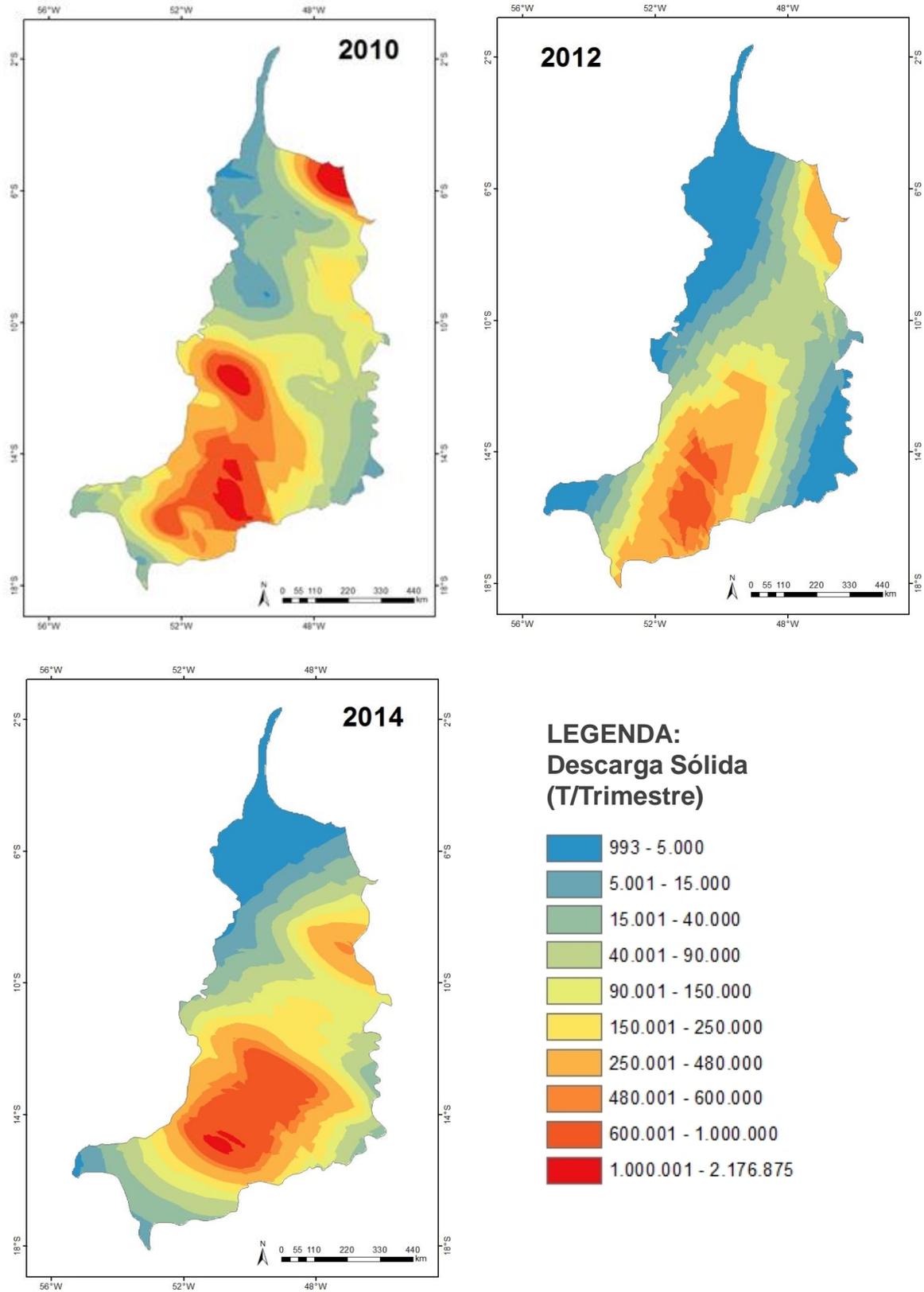
### 4.2.1 Período Chuvoso

Os modelos espaciais de descarga sólida em suspensão, gerados para os anos de 2010, 2012 e 2014 para o período chuvoso, estão ilustrados da Figura 21. A análise dos modelos espaciais mostrou haver, de uma forma geral, um padrão constante para os anos analisados. O padrão da variabilidade espacial com maior incidência de sedimentos coincide com as zonas mais úmidas da distribuição espacial das chuvas. Estas regiões apresentam os maiores valores de precipitações, em níveis superiores a 1.300 mm (figura 20-c). Conforme MMA (2016), estas zonas mais úmidas localizam-se na subdivisão Araguaia e na parte sul, em correspondência com o paralelo 16°S. Deste paralelo para o sul, na região da nascente do rio Araguaia, as precipitações diminuem. Na faixa da região correspondente ao médio Araguaia-

Tocantins as precipitações também diminuem, no sentido oeste-leste (MMA, 2016). A região que apresentou os maiores índices de descargas sólidas de sedimentos está localizada na região em que a predominância do solo é o Plintossolo (Figura 20-d).

No padrão da produção de sedimentos caracterizado na Figura 21 existem duas alterações significativas ao longo dos quatro anos e é possível conjecturar que estas sejam decorrentes, principalmente, das mudanças do uso da terra ocorridas no período entre 2010 e 2014. Uma alteração está relacionada à redução dos valores de produção de sedimentos nas áreas de maior incidência, ou seja, o mapa de 2014 apresenta uma diminuição significativa das faixas vermelha e laranja escuro (600.001-2.176.875). Este impacto pode ser considerado positivo e é possível conjecturar a relação com o fato de que nesta região a expansão agrícola ocorreu predominantemente em áreas previamente antropizadas e o processo de conversão aconteceu prioritariamente na substituição de pastagens naturais para pastagens com manejo e agricultura de larga escala, favorecida pela mecanização e intensificação da produção com técnicas de manejo mais desenvolvidas. As melhorias implementadas para aumento da produção através das técnicas de manejo são fundamentais para controlar a erosão. As pastagens com manejo, por exemplo, aumentam os teores de matéria orgânica e promovem associações de partículas que favorecem a estabilização dos solos. (CHAVES; PIAU, 2008). A outra alteração significativa foi a ampliação das áreas de descarga sólida em suspensão com valores intermediários, ou seja, crescimento das áreas com produção entre 90.000 a 250.000 T/trimestre, conforme Figura 21. Este crescimento foi no sentido da região em que se identifica um aumento das áreas de pastagens com manejo.

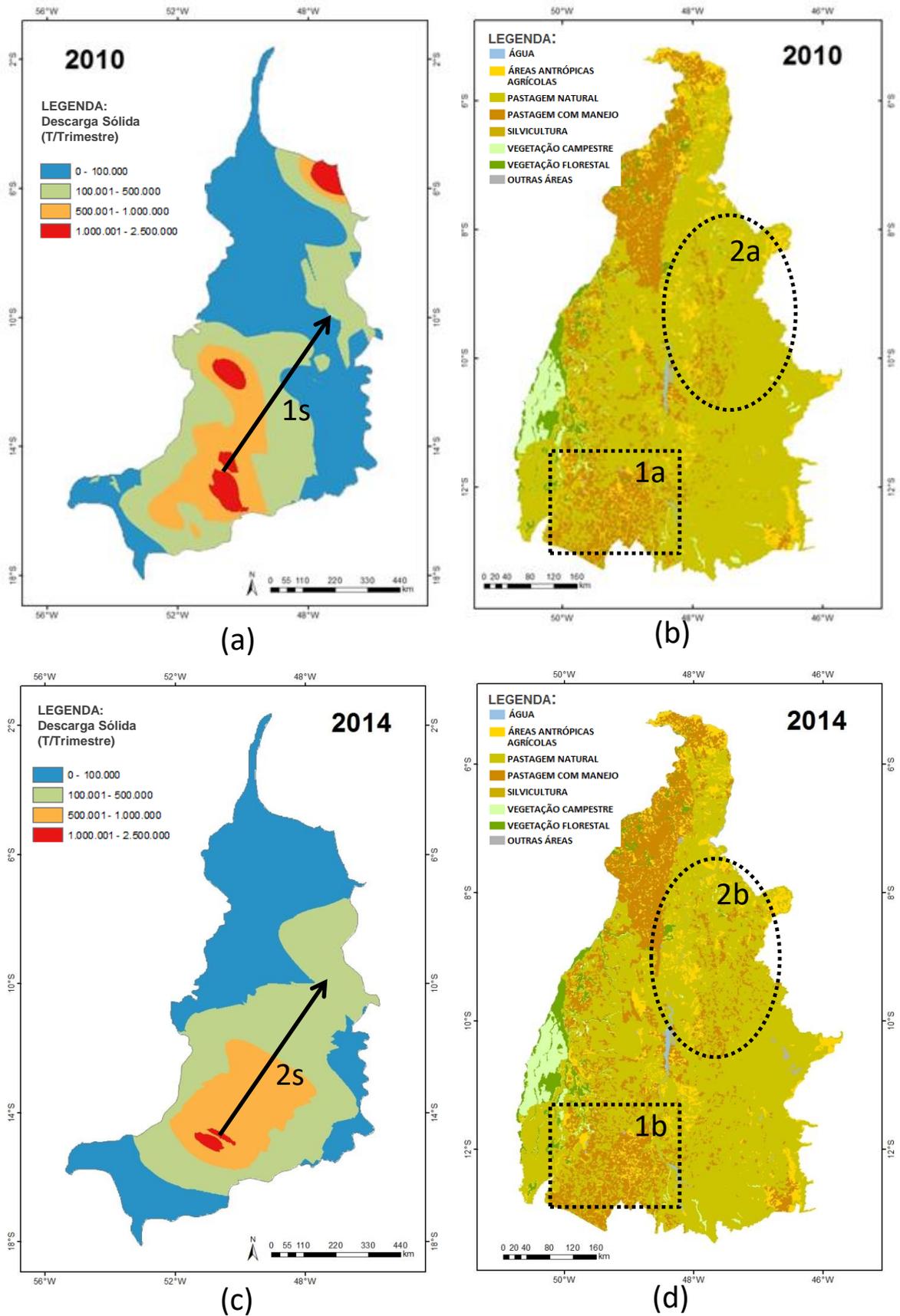
Figura 21 – Modelos espaciais de descarga sólida em suspensão – Anos 2010, 2012 e 2014.  
Período chuvoso



Fonte: Autor

Estas mudanças são mais facilmente observadas com a alteração na classificação das faixas de produção de sedimentos, para isto os mapas dos anos 2010 e 2014 estão representados juntamente com o mapa de uso da terra na Figura 22. Comparando a área 1a com a 1b, observa-se pouca variação nas áreas antropizadas o que relaciona-se com os argumentos do paragrafo anterior, uma redução dos valores de produção de sedimentos em função da substituição dos tipos e qualidade de manejos do solo. Já nas áreas 2a e 2b, houve um aumento significativo das áreas de pastagem com manejo sobre as áreas de pastagem natural e um aumento na produção de sedimento que mudam da classe azul para a verde, sentido da seta 2s.

Figura 22 – Comparação dos mapas de descarga de sedimentos e uso e cobertura da terra. Período chuvoso

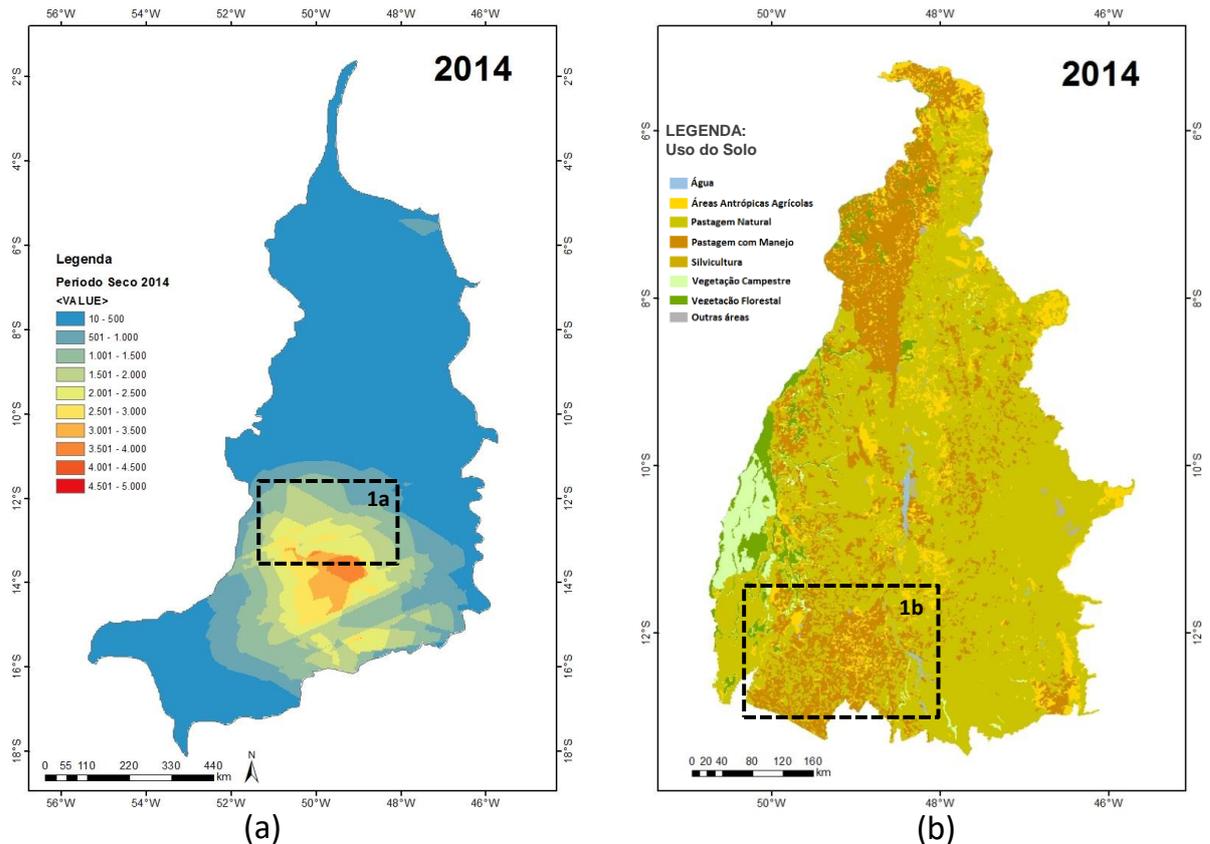


Fonte: Autor

#### 4.2.2 Período Seco

Com objetivo de identificar o padrão de variabilidade foi gerado o mapa com o modelo espacial de descarga sólida em suspensão com 10 classes de cores, variando de 0 a 5.000 T/trimestre (Figura 23). O padrão apresentado é semelhante ao identificado no período chuvoso que pode ser verificado através da comparação as regiões 1a e 1b, os mapas do modelo espacial de descarga sólida do período seco e o de uso da terra de 2014.

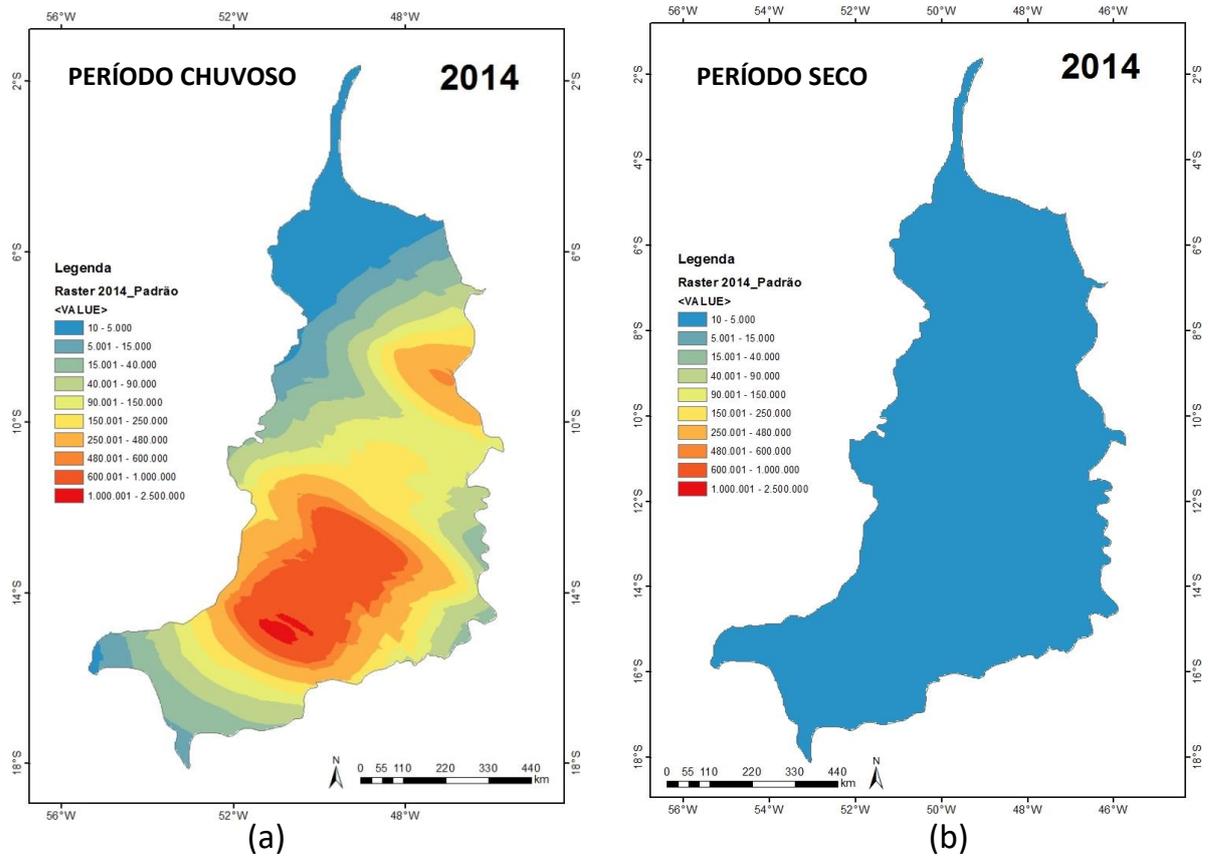
Figura 23 – Comparação dos mapas de descarga de sedimentos e uso e cobertura da terra. Período seco



Fonte: Autor

Na Figura 24 estão representados os modelos espaciais gerados para o período chuvoso e seco, do ano 2014. As classes dos intervalos foram mantidas para comparação dos valores da descarga sólida em suspensão gerados em ambos os períodos, sendo que o período chuvoso apresentou um aumento de 500% em relação ao seco. Os valores de descarga sólida em suspensão foram menores que 5.000 T/trimestre, primeira classe (azul).

Figura 24 – Mapas de descarga sólida em suspensão do MATOPIBA (região Tocantins), períodos chuvoso (a) e seco (b) do ano de 2014.



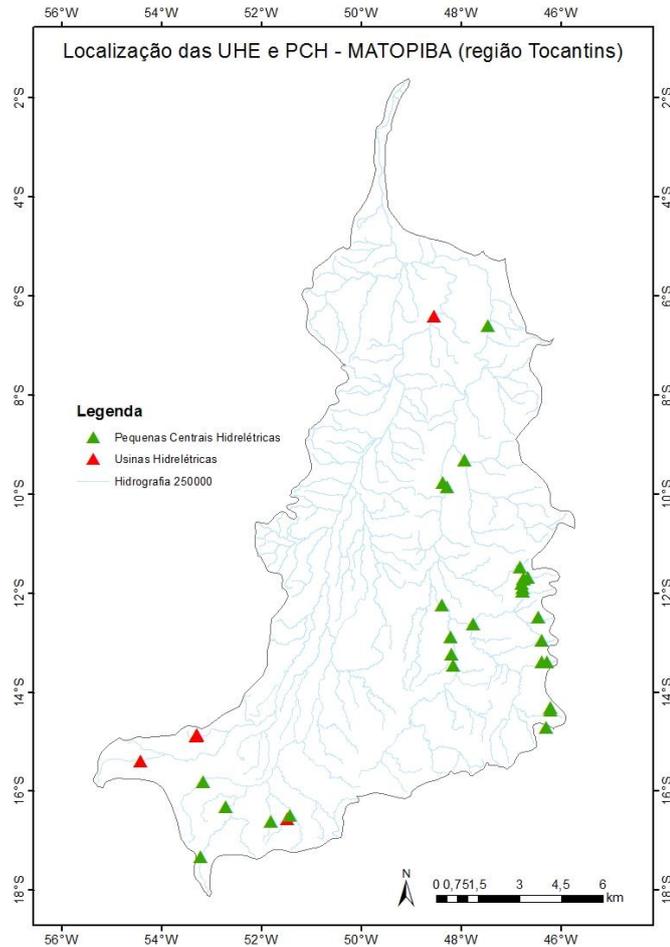
Fonte: Autor

#### 4.3 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E A DISTRIBUIÇÃO DAS HIDRELÉTRICAS

A geração de energia de uma hidrelétrica está diretamente relacionada a capacidade dos reservatórios e estes são impactados frequentemente pelos processos de sedimentação. A velocidade da deposição dos sedimentos nos reservatórios determina sua vida útil. Sendo assim, o monitoramento do assoreamento é uma prática fundamental para o controle e planejamento de ações preventivas e corretivas com objetivo de minimizar os efeitos que comprometem a geração de energia.

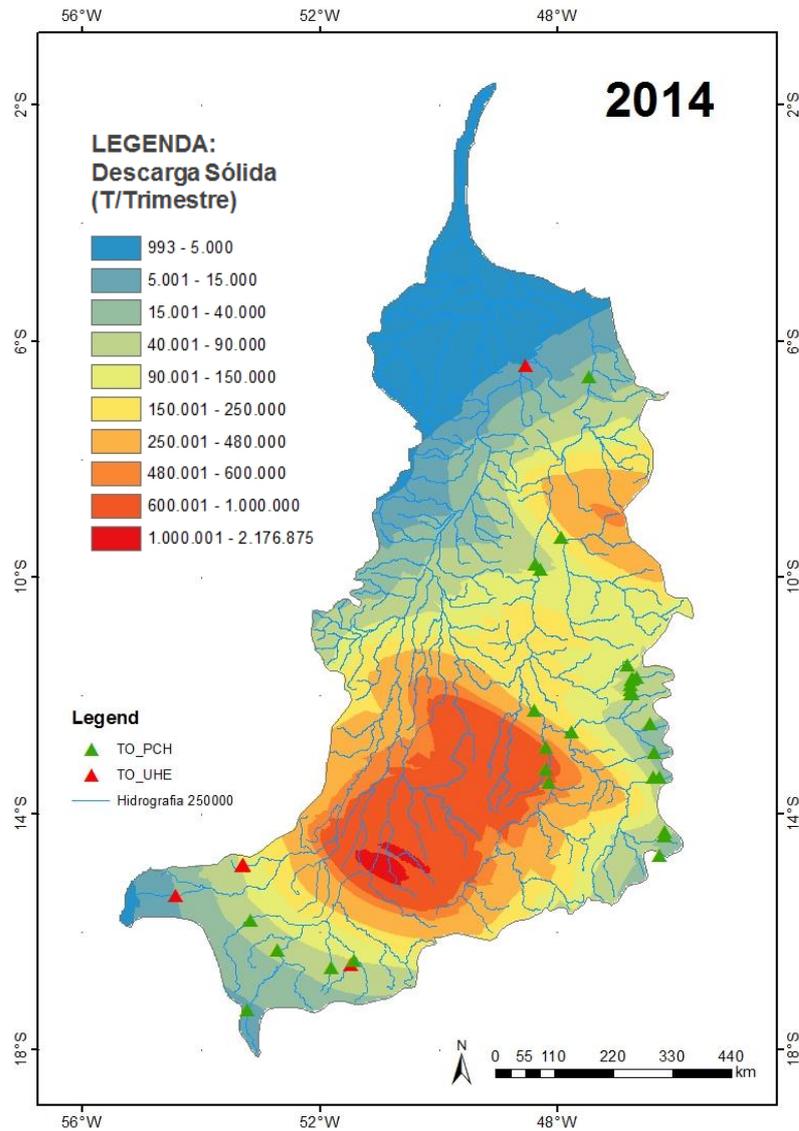
Para a análise do cenário atual produção de sedimentos e a distribuição das hidrelétricas do MATOPIBA, na região situada no Tocantins, foi realizado um levantamento da relação das Usinas Hidrelétricas e Pequenas Centrais Hidrelétricas da região, assim como suas coordenadas. Estes pontos de localização das UHE e PCH foram utilizados para geração do mapa de localização das mesmas, conforme Figura 25.

Figura 25 – Localização das UHE's e PCH's do MATOPIBA (região Tocantins)



O cruzamento dos mapas de localização das UHE's e PCH's com o modelo espacial de descarga em suspensão está representado na Figura 26. A maioria das hidrelétricas está localizadas nas regiões com valores menores que 250.000 T/trimestre (32 hidrelétricas). Enquanto que apenas quatro estão localizadas em região com valores superiores de sedimentos, entre 250.000 e 600,000 T/trimestre. Os dados sedimentométricos são fundamentais para o monitoramento do assoreamento dos reservatórios, pois os sedimentos impactam negativamente gerando a perda da capacidade de armazenamento, entupimento das saídas do reservatório, abrasão de máquinas hidráulicas que possibilitam a diminuição de sua eficiência e o aumento dos custos de manutenção. Para minimizar estes impactos a utilização de dragagem é utilizada para remover o excesso de sedimentos e permitir um fluxo total de água, entretanto é uma solução de engenharia que apresenta alto custo (CARVALHO *et al.*, 2000).

Figura 26 – Localização das UHE's e PCH's no modelo espacial de descarga sólida em suspensão. Período chuvoso



Fonte: Autor

O modelo espacial apresentado na Figura 26 pode auxiliar, ainda, a identificação das áreas com maior potencial para implantação de novas hidrelétricas. As regiões que apresentam menores valores de descarga sólida em suspensão são mais propícias aos novos projetos de implantação de hidrelétricas. A expectativa de crescimento do MATOPIBA para um período de 2017 a 2027 é de 15% em área plantada de grãos, ou seja um aumento de 7,3 Mha para 8,4 Mha (GASQUES *et al.*, 2017). No entanto existem grandes desafios nas melhorias na estruturação da região para o acompanhamento desta evolução, como as condições energéticas, logística, transporte terrestre, portuário e comunicação. Os projetos de transmissão, distribuição e geração de energia são considerados estruturantes para o

desenvolvimento agrícola, permitindo acesso a serviços básicos como energia elétrica, comunicações, transportes urbanos e saneamento, promovendo a redução de custos e contribuindo para o aumento da produtividade.

Conforme projeção realizada por (FILHO; HACKENHAAR; ABREU, 2015), a potência elétrica a ser instalada necessária para atender à demanda de energia das atividades agrícolas e pecuárias é da ordem de 2.268.372,80 kW (Tabela 5).

Tabela 5 - Previsão de aumento de potência (kW) para atendimento ao crescimento do MATOPIBA.

MATOPIBA	Potência Atual (kW)	Potência Necessária (km)
Maranhão	3.065.858,00	490.537,28
Tocantins	1.909.071,00	305.451,36
Piauí	398.528,00	63.764,48
Bahia	8.803.873,00	1.408.619,68
<b>Total</b>	<b>14.177.330,00</b>	<b>2.268.372,80</b>

Fonte: Filho; Hackenhaar; Abreu, (2015)

## 5 CONCLUSÕES

Pode-se afirmar em função dos resultados obtidos os seguintes pontos:

- A modelagem utilizando a geoestatística foi eficiente na avaliação da variabilidade espacial de sedimentos fluviais em cenários com escassez de dados e também foi eficaz para avaliação intra-anual de dados hidrossedimentológicos;
- As principais vantagens desta ferramenta de interpolação em relação aos outros métodos são que os pesos são determinados a partir de uma análise de correlação espacial baseada no semivariograma e detecta as direções de maior e menor continuidade espacial do fenômeno.
- Os resultados demonstraram que a quantidade de sedimentos fluviais em suspensão é fortemente influenciada pela precipitação no período chuvoso nas principais regiões da subdivisão do rio Araguaia e na parte sul. No período seco, os resultados seguem o mesmo padrão e podem ser influenciados por outros fatores como a cobertura vegetal, o uso e ocupação do solo, o tamanho da área de drenagem e a declividade.
- A análise temporal demonstrou que houve redução da quantidade de sedimentos em suspensão nas regiões que apresentaram os maiores índices no ano de 2010, quando comparados com 2014. Estas mudanças podem ter tido a influência da mudança do uso da terra, onde a expansão agrícola ocupou áreas antropizadas antes de 2010. A intensificação da mecanização e aplicação de diferentes tipos de manejos de solo diminuiu a exposição à degradação. Por outro lado, houve uma expansão das áreas com valores intermediários de quantidades de sedimentos.

## REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Inventário das estações fluviométricas**. Brasília: Ana, 2009.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano de desenvolvimento da rede sedimentométrica da ANA**. Brasília: Ana, 2006. p. 71.

ARROIO JUNIOR, P. P. **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

BARISON, M. R.; INÊS, M.; ALVARENGA, N. Solos. **Ciências ambientais para engenharia**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 55–83. Elsevier, Rio de Janeiro.

BOLFE, L. E. *et al.* MATOPIBA: análise do uso da terra e a produção agrícola. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 18., 2017, Santos-SP. **Anais [...]**. 2017. p. 7467–7474.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. **Principles of geographical information Systems**. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

CARVALHO, N. de O. *et al.* **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: Aneel, 2000. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/GuiaAsso.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2017.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CHAVES, H. M. L.; PIAU, L. P. Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 333–343, 2008.

DIDONÉ, E. J. *et al.* Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1287–1297, 2014.

DONAGEMMA, G. K. *et al.* Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

DURAES, M. F. **Desenvolvimento do índice de perturbação hidrossedimentológica: aplicação nas bacias hidrográficas dos rios Paraopeba e Sapucaí**. 2013. 224 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. de. Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 677–685, 2016. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522016000400677&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522016000400677&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 21 nov. 2015.

EVANGELISTA, B. A. *et al.* Zoneamento de risco climático para determinação de épocas de semeadura da cultura da soja na região MATOPIBA. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 18, p. 48, 2017.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, n. 1–2, p. 1–45, 1999.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mudanças na cobertura e uso da terra**. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2017/01/04/ibge-as-mudancas-na-cobertura-e-uso-da-terra-no-brasil>. Acesso em 03 jul 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de uso da terra**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: [http://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_geociencias.htm](http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm). 2016.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford, 1989.

LANDIM, P. M. B. Geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v. 2, n. 1, p. 19–33, 2006.

LANDIM, P. M. B.; YAMAMOTO, J. K. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

LUMBRERAS, J. F. *et al.* **Aptidão agrícola das terras do Matopiba**. 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1025303>. Acesso em: 15 nov. 2017.

MAGALHÃES, L. A.; MIRANDA, E. E. **Matopiba: quadro natural - nota técnica 5**, 2014. p. 1–41. Disponível em: <https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/>. 2014. Acesso em: 16 out. 2017.

MEADE, R. H.; MOODY, J. A. Causes for the decline of suspended-sediment discharge in the Mississippi River system, 1940–2007. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 45, n. 151, 2009. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.7477>. Acesso em: 16 jul. 2017.

MINGOTI, R. *et al.* Matopiba: caracterização das áreas com grande produção de culturas anuais. **Embrapa: Folheto**, p. 1–2, 2014.

MINGOTI, R.; HOLLER, W. A.; SPADOTTO, C. A. Matopiba: caracterização das áreas com grande produção de culturas anuais. **Embrapa Gestão Territorial: nota técnica 06**, p. 1, 2014.

MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. Nota técnica 1: proposta de delimitação territorial do MATOPIBA. **Embrapa**, v. 1, p. 1–18, 2014. Disponível em: [https://www.embrapa.gov.br/gite/publicacoes/NT1\\_DelimitacaoMatopiba.pdf](https://www.embrapa.gov.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf). Acesso em: 15 fev 2017.

PALMIERI, A.; SHAH, F.; DINAR, A. Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. **Journal of Environmental Management**, v. 61, n. 2, p. 149–163, 2001. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030147970090392X>. Acesso em: 16 mar 2017.

PAWAR, R. J. Introduction to geostatistics: developments in petroleum. **Science**, p. 126–154, 2003.

RUFFATO-FERREIRA, V. *et al.* A foundation for the strategic long-term planning of the renewable energy sector in Brazil: hydroelectricity and wind energy in the face of climate change scenarios. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, n. oct. 2015, p. 1124–1137, 2017.

SILVA, B. C.; CALHEIROS, H. C. Águas superficiais. *In*: CAPAZ, R. S.; NOGUEIRA, L.A.H. (org). **Ciências Ambientais para Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. p. 85–122.

SYVITSKI, J. P. M.; KETTNER, A. Sediment flux and the anthropocene. **Philosophical Transactions Of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 369, n. 1938, p. 957–975, 2011. Disponível em: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsta.2010.0329>. Acesso em: 13 jun. 2016.

WALLING, D. E.; FANG, D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 39, n. 1–2, p. 111–126, 2003.

WANG, H. *et al.* Recent changes of sediment flux to the western Pacific Ocean from major rivers in East and Southeast Asia. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 108, n. 1–2, p. 80–100, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.003>. Acesso em: 02 srt. 2017.

Ximenes, B. J.; HACKENHAAR, N. M.; ABREU, Y. V. Matopiba: paradigmas energéticos da nova fronteira agrícola. *In*: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 10., 2015, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/agrener2015/sites/default/files/tematica4/705.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2016.

XU, K.; MILLIMAN, J. D. Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 104, n. 3–4, p. 276–283, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.004>. Acesso em: 15 jul. 2017.

YUE, X. *et al.* Dynamic changes of sediment load in the middle reaches of the Yellow River basin, China and implications for eco-restoration. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 73, p. 64–72, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.014>. Acesso em: 03 ago. 2016.