

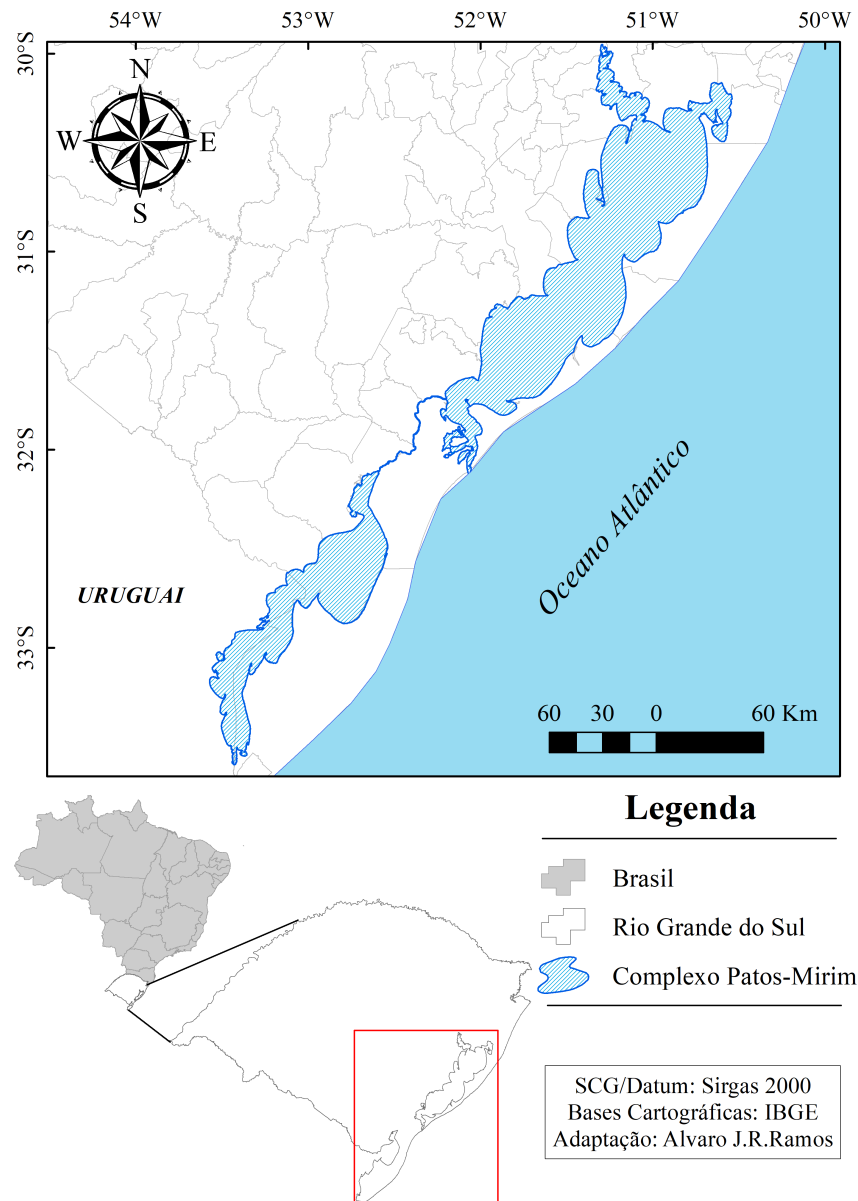


Figura 2.1 – Lagoa dos Patos.

importância política, consideram-se também as atividades econômicas relacionadas a práticas industriais, agricultura, e pecuária. O principal uso das águas da Lagoa Mirim é baseado nas retiradas diretas para utilização na irrigação das lavouras de arroz por agricultores uruguaio e brasileiros (IRGA, 2006).

2.2.2. Canal São Gonçalo

O canal está localizado na região noroeste do estuário da Lagoa dos Patos, possuindo aproximadamente 70 km de extensão e intercomunicando as Lagoas dos Patos e Mirim (Fig. 2.3). Comumente possui escoamento no sentido Lagoa Mirim para a Lagoa dos Patos, no entanto, este fluxo não atua como regra, podendo ser invertido de maneira irregular durante o ano, efeito que ocorre normalmente em períodos de alta estiagem na Lagoa Mirim (Hartmann e Harkot,

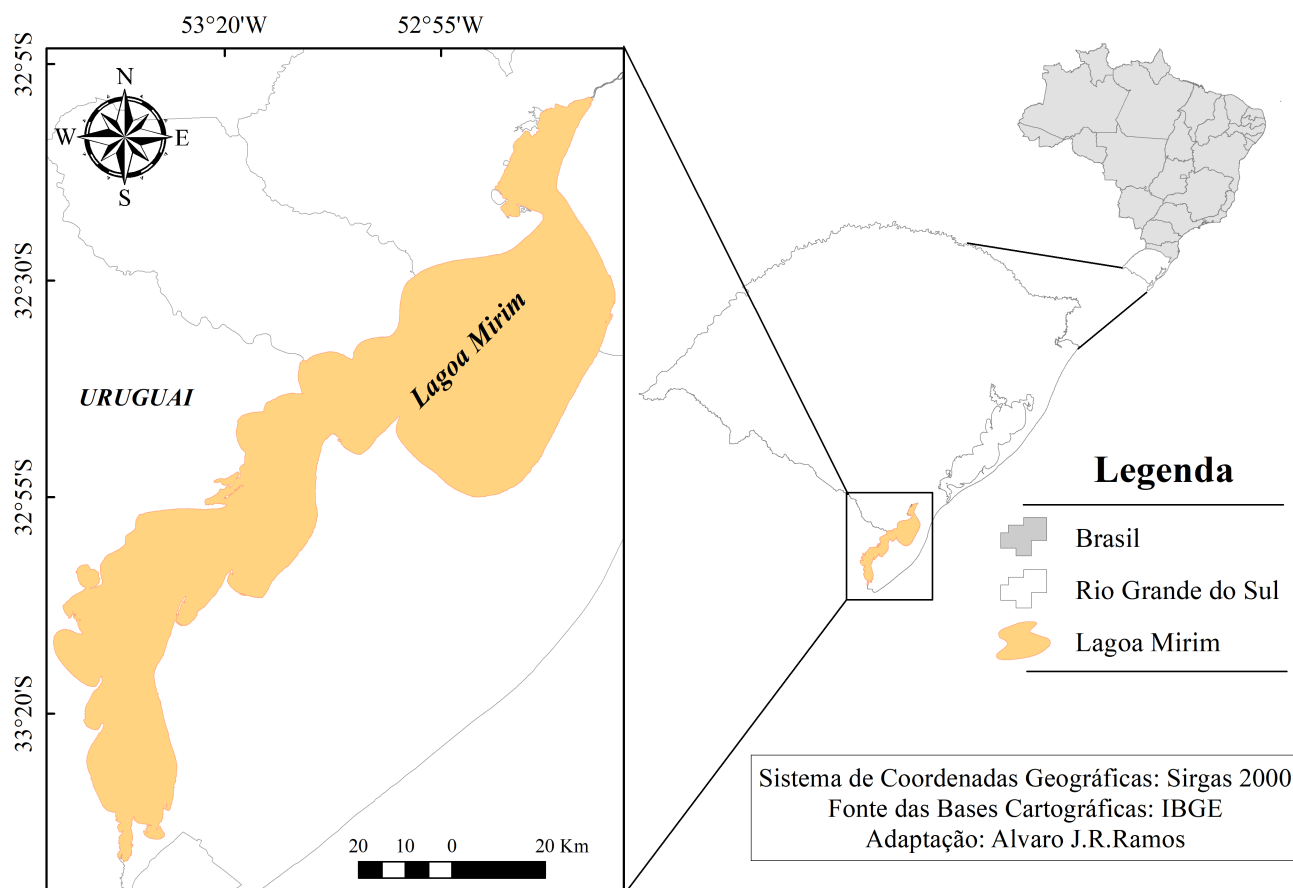


Figura 2.2 – Delimitação da Lagoa Mirim.

1990).

O local possui um exutório natural que atualmente encontra-se controlado através de uma barragem que possui um sistema de portas, separando a Lagoa dos Patos da Lagoa Mirim, e que apresenta como principal finalidade dificultar intrusões de fluxos salinos através da jusante. Segundo Fia et al. (2009) a região do canal apresenta intensa atividade agrícola, voltados principalmente ao cultivo de arroz irrigado. Neste aspecto, as águas provenientes do canal servem para irrigação nos cultivos da região.

Sendo assim, espera-se que estas águas sofram intenso estresse hídrico, fato comprovado em resultado obtido pelo Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB, 2016), que descreve um consumo médio anual de aproximadamente $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ da vazão total do rio. Em contrapartida, o curso de água recebe altas concentrações de efluentes, e a intensa degradação das margens e linhas adjacentes favorece a entrada de sedimentos no Canal São Gonçalo, essencialmente pelo processo de lixiviação.

De acordo com Vieira (1982), ao longo do canal é possível encontrar sedimentos grosseiros (formados principalmente por areia) como também sedimentos finos (essencialmente silte e argila), após a floculação devido ao encontro com águas de características salinas da Lagoa dos Patos, ocorre o efeito de aumento da concentração de componentes finos, denotando a formação

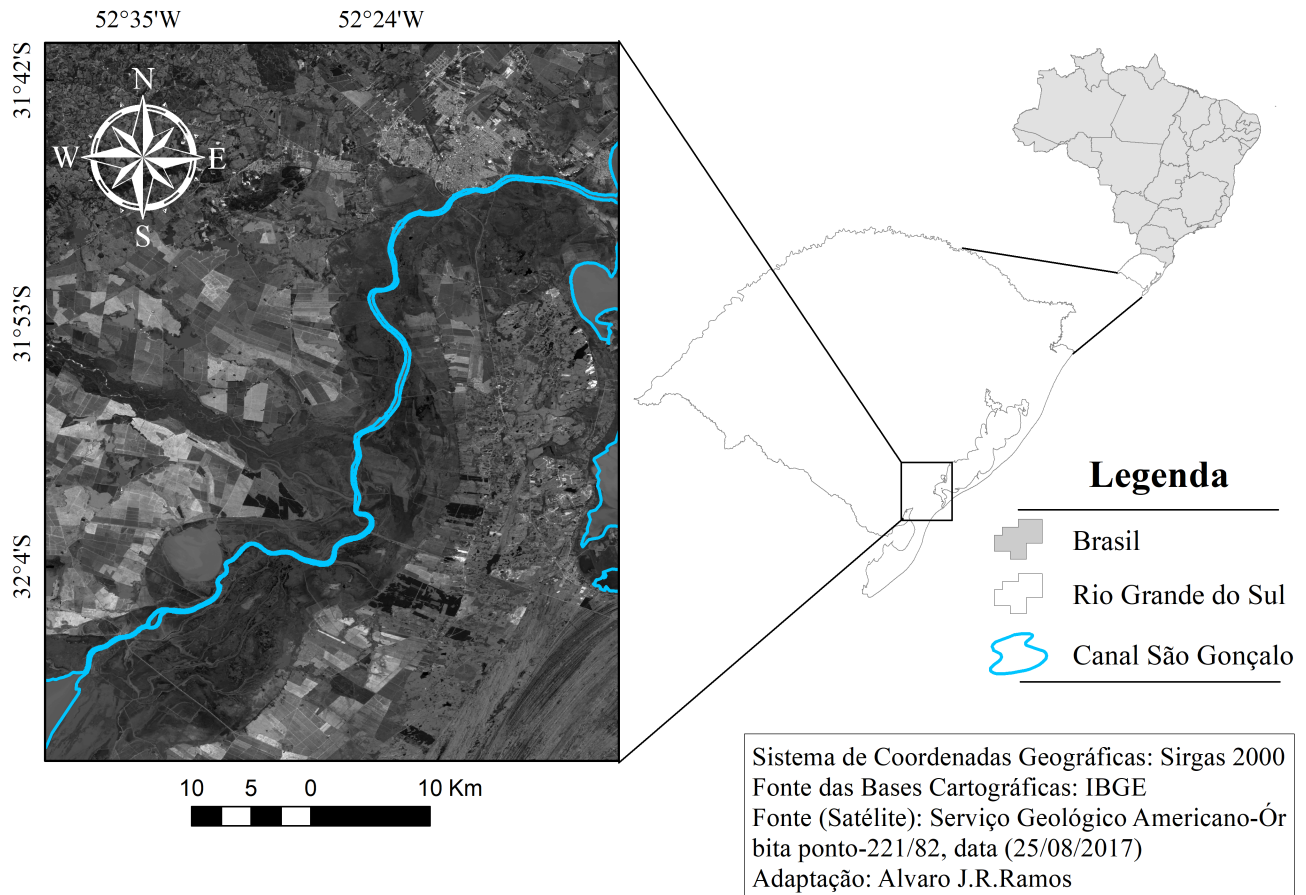


Figura 2.3 – Localização do Canal São Gonçalo.

de uma camada de lama fluida nas porções mais profundas do canal.

Em direção à Lagoa Mirim, o autor descreveu o processo inverso, neste caso, encontrando sedimentos mais finos nas regiões consideradas mais rasas do canal, enquanto os sedimentos grosseiros são depositados em porções consideradas mais profundas, evidenciando o canal como um sistema de elevada hidrodinâmica.

2.2.3. Rio Guaíba

A região hidrográfica pertencente à bacia do Guaíba é considerada por Laybauer e Bidone (2001) como o local de maior adensamento populacional do Rio Grande do Sul, consequentemente existe alta concentração de atividades econômicas. É considerado por Oliveira (1919) um dos mananciais de água doce mais relevantes do sistema costeiro lagunar no Rio Grande do Sul, particularmente para a cidade de Porto Alegre, que encontra-se situada em sua porção leste e usufrui de suas águas em prol do abastecimento público.

O Rio Guaíba encontra-se em sítios geomorfológicos dominados pela planície costeira interna, dominadas por relevos relativamente baixos e constituídos, essencialmente, por sedimentos não consolidados (Fig. 2.4). A vazão padrão descrita para o complexo do Guaíba segundo diferentes autores está entre 1.300 e 2.000 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, podendo atingir até 15.000 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ em

períodos com elevadas taxas de pluviosidade (Marques (2005); Kirchhof (2015)).

Para Andrade Neto et al. (2012) as elevações nas taxas de precipitação no inverno potencializam as taxas de descargas sedimentares na bacia do Guaíba, contribuindo para elevação das taxas de turbidez da água. Em consonância a isto, está o fato de que na região da Bacia do Guaíba se localizam diversas barragens que interferem na vazão total do rio. Desta forma, Kirchhof (2015) descreveu que no verão, com menores índices de vazão, o aporte total de sedimentos também se reduz.

Seus resultados contrapõem os descritos por Andrade Neto et al. (2012), que observaram valores maiores, localizados entre 50 e 54 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, enquanto os dos referidos autores estiveram na faixa de 35 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Tais divergências foram descritas pelos autores como explicáveis pelo método de coleta de Andrade Neto et al. (2012), que utilizaram pontos fixos localizados nas margens onde apresentam menores taxas de concentração total de sólidos em suspensão.

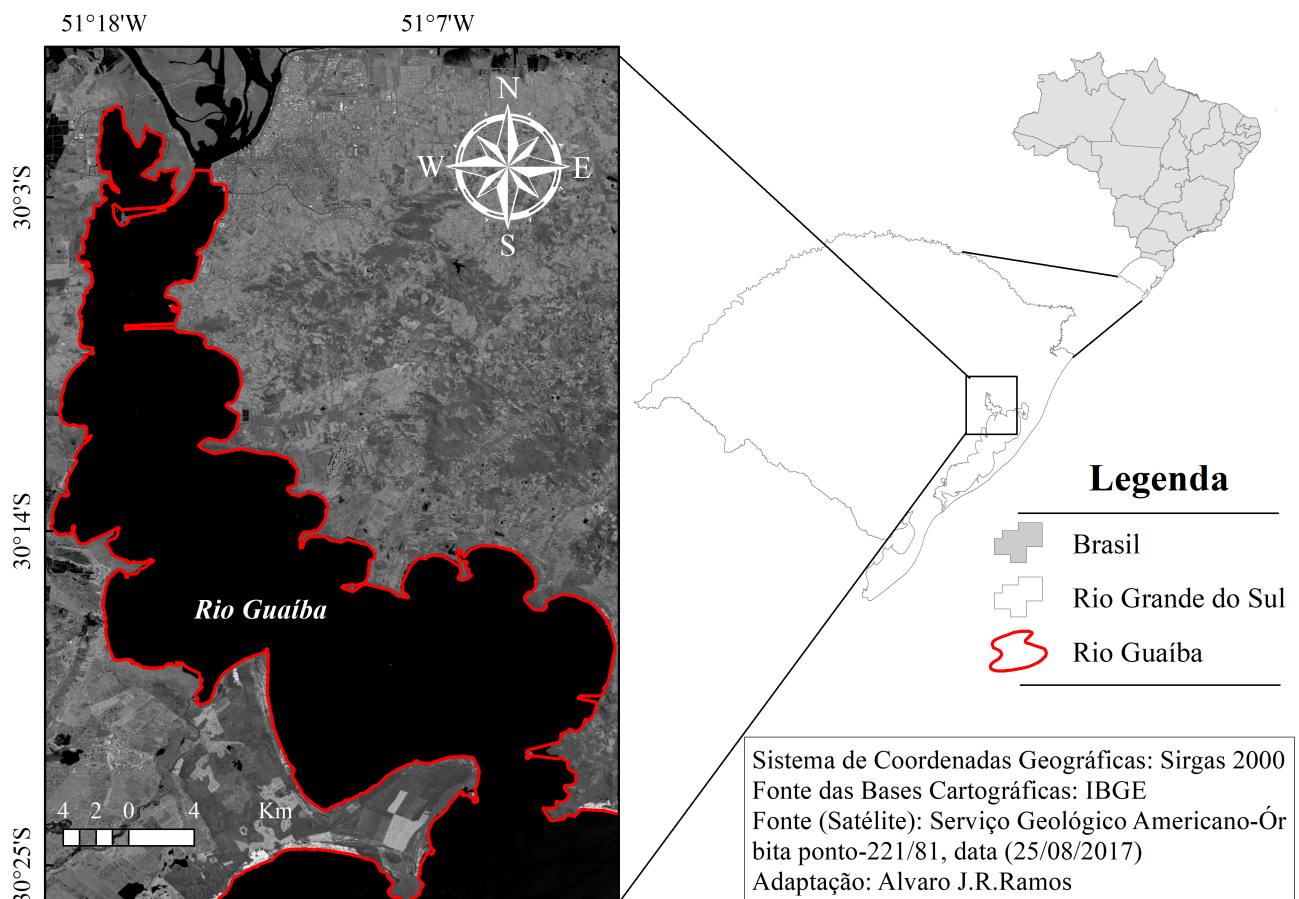


Figura 2.4 – Rio Guaíba.

2.3. Aspectos sedimentares

Os sedimentos são genericamente definidos por Mudrock e MacKnight (1994) como partículas com ampla variedade de tamanho, composição química e formas geométricas. Podem ser transportados por diferentes fluidos a partir de seus pontos de origem, normalmente estão localizados nos ambientes terrestres, e posteriormente agem como materiais depositários presentes nos fundos de corpos hídricos. Outras origens destes compostos permeiam o surgimento a partir de materiais precipitados, resultante de meios naturais ou por ações humanas, agregando processos químicos e biológicos, e assumindo neste aspecto, proporções variantes entre os ambientes de origem.

Deste modo, o processo de deposição sedimentar natural é caracterizado por Carvalho (2000) como proveniente de enxurradas ao longo de uma determinada bacia, e a dinâmica depositária compreende três fases principais. Inicialmente denotam-se arrastos de pequenas partículas ou decomposição oriundas dos materiais vivos, posteriormente ocorre o processo de sedimentação destes materiais, também conhecido com precipitação de elementos, e por fim, o processo se encerra com o acúmulo e armazenamento no leito dos lagos e reservatórios. Deste modo, os compostos sedimentares, em diferentes complexos, estão relacionados intimamente ao assoreamento, turbidez, retenção de produtos tóxicos no ambiente, além de contribuir como fonte alimentar para o contingente faunístico. O mesmo autor ressalta que os valores de produção sedimentar adequadas funcionam como forma de prevenção de riscos na qualidade da água.

Assim, é evidente o papel desempenhado pelos componentes sedimentares no transporte físico, geo-acumulação e na condensação biológica de compostos orgânicos e nutrientes. Sendo importante notabilizar que a carga poluidora originária dos despejos domésticos e industriais, lançadas nos mananciais, está concentrada principalmente nos sedimentos dissolvidos nos ambientes aquáticos. Onde, a relativa contribuição dos sedimentos na biodisponibilidade de inúmeros componentes químicos é observada como fundamental, sendo reconhecida e reforçada notadamente sua relevância nos ambientes aquáticos (Silvério, 2003).

Especificamente, no complexo da Lagoa dos Patos, diferentes estudos abordam a dinâmica sedimentar em consonância aos ambientes aquáticos. Em estudo que visava abordar características ligadas a processos de sedimentação que proporcionaram a compartimentação da laguna, através do crescimento de pontais arenosos característicos do local, Villwock et al. (1986) descreveram que os sedimentos depositados no ambiente lagunar são constituídos principalmente por terraços marinhos e lagunares, além de depósitos eólicos em praias. Estes autores denotaram que os materiais são posteriormente erodidos e chegam à laguna por meio de transporte fluvial direto, sendo que outra parte é levada por via eólica.

Os materiais são acumulados de maneira predominante na desembocadura dos rios, formando assim pequenos deltas, em contrapartida, o material transportado pela ação dos ventos é espalhado nas antepraias lagunares, e são posteriormente realocados pelas ondas e correntes provenientes do litoral. Na região, a maior quantidade de sedimentos é proveniente de proces-

solos erosivos das encostas, pela ação de ondas e correntes, que nos recentes períodos geológicos ajudam a tornar evidente a atual configuração deposicional sedimentar de fundo. Pela formatação encontrada no local, para áreas fonte de produtos sedimentares, consideram-se os terraços marinhos como principais agentes formadores e influenciadores da dinâmica sedimentar lagunar (Villwock et al., 1986).

Segundo o sistema brasileiro de classificação de solos- SiBCS (EMBRAPA, 2006), os solos são definidos como uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes elementares nos três estados físicos (sólidos, líquidos e gasosos), sendo formados principalmente por minerais e compostos orgânicos, que compõem parte do manto superficial presente no planeta, podendo estes serem ocasionalmente modificados por ações humanas. Os sedimentos que compõem determinado ecossistema aquático são altamente influenciados pelos solos que compõem determinada bacia hidrográfica. Segundo Carvalho (1994), a geração dos compostos sedimentares está intimamente relacionada a três fatores: intemperismo continental, restos orgânicos de conchas minerais e precipitação de cristais inorgânicos.

Em estudo que visava caracterizar a gênese, além de classificar solos na região dos tabuleiros da planície costeira do Rio Grande do Sul, Schneider (2005) observou que na planície ocorrem solos que possuem horizontes A, de espessura mutável, de textura comumente variante de arenosa a franco arenosa, que são transicionados de maneira abrupta para um horizonte B, argilo arenoso a argiloso.

Segundo Streck (2008), no estado do Rio Grande do Sul existe a diversidade de pelo menos doze tipos de solos, além da existência de solos considerados jovens ou rasos e de perfis insuficientemente evoluídos, a exemplo: Gleissolos, Neossolos, Luvisolos, Plintossolos, Organossolos, Planossolos e Vertissolos, ademais, outros se configuram como medianamente rasos, podendo apresentar características mais profundas como: Cambissolos e Chernossolos. Em contrapartida, solos do tipo Argissolos, Nitossolos e Latossolos evidenciam perfis que variam de profundos a muito profundos.

2.4. Geologia local

A planície costeira adjacente à Lagoa dos Patos mostra elevações médias características de 6 m e constitui-se, em sua maioria, por depósitos arenosos cessados mediante diminutos cursos de água. Tais depósitos arenosos estão relacionados a alguns eventos transgressivos desenvolveram distintos sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira, nos quais o sistema considerado mais antigo foi constituído durante o Pleistoceno, em contrapartida com o considerado mais jovem, que teve sua formação no decorrer do Holoceno (Villwock et al., 1986). O autor ainda ressalta que a Lagoa dos Patos é essencialmente constituída de quatro grandes seqüências deposicionais.

Segundo Martins et al. (1989), o primeiro sistema expressa-se exclusivamente no decorrer da margem oeste da Lagoa dos Patos e se constitui, fundamentalmente, de reduzidos leques aluviais coalescentes. Em contrapartida, a ampla barreira que separa a laguna do oceano é

formada pelos sistemas laguna-barreira. No decorrer do período Holoceno, os depósitos dos sistemas antigos foram em parte rearranjados pela ação de ondas e por correntes provenientes do interior da laguna, sendo a estruturação de extensos pontais arenosos o principal resultado da redistribuição sedimentar.

Os pontais possuem altura média de 1 m acima do nível médio da água, e na porção ocidental, as parcelas submersas dos corpos arenosos se prolongam por cerca de 15 km para o seguimento inferior da laguna. A Lagoa dos Patos mostra dois espaços de caráter sedimentológico e morfológico diferenciados, onde o primeiro espaço equivale às margens arenosas e o segundo ao fundo lamoso e plano da laguna, com esta última ocupando a maior parte do espaço (Martins et al., 1989). O gradiente batimétrico disposto entre 5 e 6 m desagregam estes dois espaços dentro da Lagoa dos Patos. No segmento ocidental, a margem arenosa apresenta frequentemente declividades na ordem de 1/1500, enquanto na porção oriental, a margem arenosa manifesta maiores elevações, aproximadamente 1/200. O mesmo autor ainda relata que as margens arenosas reproduzem aproximadamente 40% de área da laguna, e que os sedimentos presentes na extensão pertencente à parte oeste da laguna são pouco proferidos com tamanhos que permitem a sua caracterização como areia fina e cascalho. Ao mesmo tempo, em sua margem posterior, as areias exibem dimensões predominantemente finas.

Os componentes lamosos depositadas no piso da Lagoa dos Patos são provenientes especialmente do Rio Guaíba e, em geral, as deposições sedimentológicas destes constituintes advêm em profundidades consideráveis, localizadas em maioria posteriormente ao nível base de erosão, resultantes principalmente da ação das ondas (Toldo, 1994). Os sedimentos do fundo lagunar mostram menos de 4% de sua formação constituída de areia que, por sua vez, são compostos essencialmente com caráter textural de frações siltosas e silte argilosas na metade norte do fundo lagunar. Toldo (1994) completa dizendo que a metade sul da Lagoa dos Patos é caracterizada por apresentar constituição de argila siltosa, com coloração verde acinzentada. O material orgânico depositário de origem terrígena é consideravelmente abundante, e indica percentagens de até 30% e os sedimentos lamosos se mostram fortemente afetados por processos de movimentação do solo, também conhecidos como bioturbação (Martins et al., 1989).

2.5. Modelagem numérica em estudos sedimentares: Estado da arte

Segundo Tucci (1998), os modelos numéricos são considerados ferramentas essenciais para compreender, descrever e mesmo simular os comportamentos padrões encontrados em determinada bacia hidrográfica ou qualquer massa de água. Para Riecken (1995), estes modelos buscam analisar e antever processos que podem acontecer em um determinado sistema caso algum fator condicional (no âmbito ambiental ou causado por alterações antrópicas) sofra modificações em determinado tempo e espaço.

Neste contexto, uma das principais utilidades da modelagem numérica é a capacidade de proporcionar estimativas de forma contínua em diferentes condições, dependendo do entendimento referente aos processos dinâmicos e exatidão dos parâmetros condicionais iniciais. Deste

modo, para diferentes aplicações requeridas, a precisão e utilidade do modelo dependem da aptidão e capacidade dos usuários para interpretar de maneira correta as informações geradas a partir das simulações.

Diante da funcionalidade e, sobretudo, da significância dos resultados obtidos pelos modelos, Gonçalves et al. (2011) destacou a relevância na aplicação da modelagem numérica como ferramenta indispensável, especificamente em estudos de gerenciamento de lagoas costeiras e outros corpos hídricos. Em virtude do que foi exposto, observando a importância e evidente aplicação dos modelos numéricos em diferentes áreas, Falconer e Owens (1990) abordaram a aplicação de um modelo numérico de diferenças finitas bidimensionais visando promover a previsão de campos de maré, estendendo o modelo para entender os processos de transporte de sedimentos, simulando o escoamento em dois estuários na Inglaterra.

Outros estudos com o uso de modelos numéricos na mesma região são descritos em Lin e Falconer (1996), os quais utilizaram um modelo numérico tridimensional para previsão de fluxos sedimentares em águas estuarinas e costeiras envolvendo o uso de diferenças finitas visando resolver equações da conservação de massa e movimento, além da equação de transporte sedimentar para prever o fluxo de sedimentos suspensos no estuário de Humber, no Reino Unido.

Abordagens com finalidades semelhantes são observadas em Howarth et al. (1991), os quais aplicaram um modelo numérico para avaliar fatores como urbanização e alterações no uso do solo sobre a bacia no rio Hudson, Estados Unidos, visando observar suas influências no aporte de carbono e sedimentos no estuário. Este estudo indicou relações diretamente proporcionais entre o aumento da densidade populacional e elevações na descarga deste materiais para o corpo hídrico, havendo também relações diretas entre eventos pontuais de precipitação e despejos de volumes consideráveis de carbono e sedimentos no rio. Desta forma, Howarth et al. (1991) concluíram que para a manutenção geral do controle de fluxos de carbono orgânico e sedimentos, os eventos diários extremos e os padrões sazonais são mais determinantes quando comparados aos volumes totais durante o ano.

Trabalhos com o uso de modelos numéricos para avaliação de transporte sedimentar com aplicação das equações de Navier-stokes e modelos de turbulência, são descritos em Wu et al. (2000), o qual buscou aplicar um modelo numérico tridimensional para avaliar o transporte de sedimentos em canais abertos, simulando a carga sedimentar suspensa pela equação de convecção-difusão, solucionando as equações de fluxo pelo método dos volumes finitos.

Em estudos acerca da utilização de métodos numéricos para avaliação sedimentar com caráter regionalizado, especialmente na região da LP, foram descritas por Fernandes et al. (2005), em estudo que visava analisar espacialmente o fluxo nos gradientes presentes ao sul da Lagoa dos Patos, utilizando o modelo TELEMAC-3D. O estudo mostrou que na região, o gradiente de pressão lateral é resultado de certa interação da pressão barotrópica e esta parece controlar o fluxo transversal. Contudo, nas áreas onde a morfologia é complexa, e estão sujeitas à estratificação de densidade, o fluxo transversal é resultado da interação entre as forças baroclínicas e barotrópicas, aliadas a batimetria local. Neste contexto, os autores observaram que, em locais onde existe a presença do gradiente de densidade transversal, ocorre a redução

do momento vertical e a inibição da mistura em algumas regiões avaliadas.

A caracterização sedimentar é a base para o estudo de plumas, segundo Wright e Nittrouer (1995) os sedimentos que chegam à zona costeira adjacente passam por pelo menos 3 estágios até alcançar o transporte marinho e acumulação líquida, sendo estes: a incorporação através de plumas (costeiras ou fluviais), o processo de deposição inicial e por fim, a ressuspensão. Diferentes estudos numéricos abordam a avaliação das singularidades em seus diferentes estágios, dentre os quais merece destaque o estudo realizado por Marques et al. (2010a), que abordou a influência das forçantes externas no processo de mistura da pluma da Lagoa dos Patos, utilizando o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D.

Neste estudo, Marques et al. (2010a) observaram que as forçantes e a advecção, associadas à ação dos ventos, são os mais importantes mecanismos de manutenção de estratificação na região costeira adjacente. Estes autores destacaram ainda que existem muitos agentes moduladores que regulam a evolução dos processos de estratificação nas plumas formadas pela descarga da Lagoa dos Patos, além de destacar a importância da análise em escalas de tempo diferentes, em estudos futuros, para considerar diferentes processos na simulação numérica.

Contribuições que utilizaram modelos numéricos para o estudo das plumas na região sul do Brasil, especificamente na Lagoa dos Patos, são encontradas em Marques et al. (2009), que buscaram investigar a contribuição de diferentes forçantes para a formação e destino das plumas da região, através de modelagem numérica e análise de funções ortogonais empíricas. Estes autores observaram que a descarga fluvial é a principal forçante física que controla a formação e intensificação das plumas.

Outras colaborações referentes à avaliação de plumas, através do uso de modelos numéricos são encontrados em Marques et al. (2010b). Este estudo buscou investigar a dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos e sua contribuição para o estabelecimento de padrões de deposição sedimentar na plataforma continental sul do Brasil. Como principais resultados os autores estimaram um transporte médio de $1,3 \times 10^7 \text{ t yr}^{-1}$ de transporte de sedimentos suspensos na coluna de água através do canal de acesso a Lagoa dos Patos.

Outra contribuição interessante deste estudo é referente a ação dos ventos, que são descritos como agentes que controlam o comportamento da pluma, sobretudo no interior da plataforma continental média, ressaltando que estas influências podem sofrer modificações pela alteração na descarga fluvial durante a ação de diferentes efeitos atmosférico-oceânicos, como os eventos de *El Niño*. Conclusões semelhantes podem ser observadas em Barros et al. (2014), em trabalho que objetivava compreender a influência da descarga fluvial na hidrodinâmica da Lagoa dos Patos, comparando duas simulações para diferentes escalas de tempo (1940-1973 e 1974-2006) utilizando o modelo numérico TELEMAC-3D.

Os referidos autores observaram uma média anual, após o ano de 1973, superior a $1.080 \text{ m}^3/\text{s}$ de descarga, e significativas diferenças entre outros parâmetros analisados. Além disso, o segundo período avaliado apresentou as maiores taxas de descarga fluvial através da zona costeira. Barros et al. (2014) conclui que mudanças climáticas, como as provenientes de eventos de ENSO (El Niño oscilação Sul) podem alterar os efeitos dos parâmetros na hidrodinâmica da

região, não sendo possível determinar com precisão os efeitos causados no clima regional em consonância às condições estabelecidas pelos eventos.

Os padrões de distribuição sedimentar sofrem intensa modificação ante ações antrópicas, e tais considerações foram expostas no estudo realizado por Silva et al. (2015) na região da Lagoa dos Patos-RS, buscando observar as mudanças na dinâmica dos sedimentos finos no estuário e na porção costeira após o processo de expansão do porto no município de Rio Grande, utilizando o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D acoplado ao modelo morfodinâmico SediMorph (*Federal Waterways Engineering and Research Institute*).

Os resultados encontrados por Silva et al. (2015) mostraram que houve mudanças na redistribuição sedimentar na porção inferior do estuário, em decorrência das mudanças hidrodinâmicas locais, pela nova configuração resultante do afundamento progressivo do canal de acesso. Os autores ainda ressaltaram que as alterações na dinâmica da pluma da Lagoa dos Patos foram evidenciadas na pesquisa, mas que seriam necessários outros estudos para identificar as implicações diretas na formação de novos bancos lamosos na região costeira.

2.6. Fundamentos do sensoriamento remoto

Em função da carência de informações observacionais referentes ao comportamento das plumas fluviais para os experimentos numéricos dos componentes sedimentares em suspensão, uma alternativa de validação das simulações realizadas no presente estudo foi a utilização de informações orbitais para avaliação e caracterização do material em suspensão no complexo Patos-Mirim, se baseando em técnicas e pressupostos do sensoriamento remoto que funcionam como mecanismos de validação do modelo numérico.

Considerando a escala terrestre, e principalmente as dimensões continentais brasileiras, o sensoriamento remoto surge com o objetivo de suprir inúmeras carências informacionais, onde os dados gerados passam a ser utilizados para diversas finalidades. Deste modo, esta torna-se uma importante ferramenta no levantamento de materiais sobre os recursos naturais, auxiliando posteriormente, por exemplo, na elaboração de possíveis projetos de monitoramento.

Tais considerações são evidenciadas nos vastos referenciais encontrados para estudos que contemplam o uso de imagens orbitais e sua possível relação com os alvos presentes na superfície terrestre, fomentando a relevância do sensoriamento remoto como ferramenta para análise espacial de alta e média escala. Pode-se observar que as imagens de satélite representam uma das poucas formas de monitoramento do meio em escalas que contemplam aspectos locais e globais. Uma das principais vantagens refere-se à eficácia, rapidez e periodicidade em sua resolução temporal, além da visão sinótica singular (Crósta, 1992).

Para Novo (1988), o sensoriamento remoto pode ser definido como a ciência que utiliza os modernos sensores disponíveis, equipamentos para realização do processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, etc., e objetiva estudar o ambiente terrestre através do monitoramento e avaliação das interações presentes entre a energia da radiação eletromagnética e os elementos que compõem a superfície terrestre em diferentes manifestações.

Considerando o Sol como fonte, os sensores detectam a energia refletida pelos objetos presentes na terra, sendo a faixa do espectro solar a mais importante. Em contrapartida, quando a Terra é considerada a fonte de energia eletromagnética, se declara a faixa do termal a mais considerável na detecção da energia emitida pelos objetos.

Em ambientes aquáticos, o sensoriamento remoto voltado ao estudo da cor da água é realizado principalmente por sensores passivos, nos quais, seus sistemas empregam sensores com campo de visada relativamente estreito, capazes de monitorar com eficiência o fluxo radiométrico que chega aos detectores, sob distintos comprimentos de onda nas faixas do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

A principal característica destes sistemas é a utilização do Sol como principal fonte de energia, e a capacidade de funcionamento apenas durante o dia. Neste caso, o sinal detectado remotamente é formado a partir de diferentes condições, onde na primeira condição a luz é espalhada pela atmosfera, na segunda a luz é refletida specularmente pela superfície do corpo de água, e por fim, a luz emerge da superfície da água, posteriormente ao processo de retroespalhamento no interior do corpo hídrico (IOCCG, 2000).

Deste modo, (Gordon, 1997) destacou que a luz emergente da água contém informações importantes sobre o ambiente aquático, nas quais informações provenientes da atmosfera e a reflexão specular devem ser corrigidas. Durante o processo, a trajetória da luz emergente em direção ao sensor pode ser atenuada pela atmosfera, ocorrendo a perda de informações importantes (Fig. 2.5). O autor ainda destacou que, na altitude de um sensor orbital, aproximadamente 80% da luz que alcança o detector pode ter uma origem atmosférica, deste modo as técnicas de correção atmosféricas constituem uma importante etapa do processo de estudos da coloração do meio aquático.

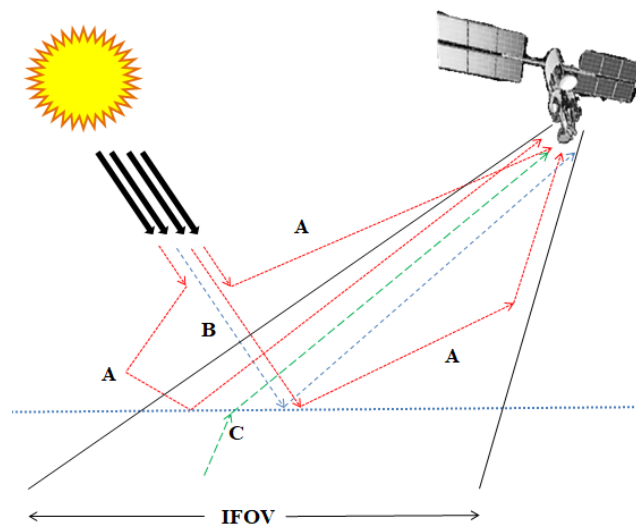


Figura 2.5 – Captação de energia pelo sensor.

Para Kampel e Novo (2016), o estudo da cor da água é definida intrinsecamente pelas alterações espectrais de sua reflectância R na superfície, em qualquer profundidade z . Neste

caso, R é definido a partir da equação geral de reflectância 2.1.

$$R_{(\lambda,z)} = \frac{E_u(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)} \quad (2.1)$$

Onde, E_u é a irradiância ascendente (fluxo por unidade de área superficial), no comprimento de onda λ e profundidade z , e E_d é a irradiância descendente, no mesmo comprimento de onda e profundidade.

Analisando os parâmetros referentes à coloração da água, bem como a reflectância no sensoriamento remoto, Preisendorfer (1976) denotou que podem ocorrer modificações destes parâmetros em decorrência da estrutura angular zenital da componente de luz incidente, originando as chamadas propriedades óticas aparentes.

Estas grandezas são definidas pelo mesmo autor como influenciadas pela distribuição angular do campo de luz e pela natureza e quantidade de substâncias presentes em determinado meio, se ressalta uma propriedade óptica aparente relevante, descrita como coeficiente de atenuação difusa da irradiância descendente (K_d), a qual determina a taxa de redução da irradiância descendente com a profundidade (Eq.2.2).

$$\frac{dE_d(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)} = -K_d(\lambda)dz \quad (2.2)$$

O coeficiente de atenuação K_d é bastante usado em modelos de penetração da luz, para calcular a produção primária em função da luz disponível em diferentes profundidades, por exemplo. Outra aplicação é o uso como um índice de transparência da água e perfis sedimentológicos, sendo uma das variáveis geofísicas que podem ser obtidas a partir de dados da cor da água. Para tanto, normalmente este coeficiente tem dimensões $[L^{-1}]$.

Em virtude da contribuição observada pelos componentes atmosféricos ao sinal dos sensores, o principal objetivo dos estudos relacionados à esta temática estão fundamentados na interpretação da radiância ascendente que tem sua origem no meio aquático e possui as características óticas das camadas mais superiores dos corpos de água. Estas singularidades passam então a ressaltar possíveis variações e tipos de materiais dissolvidos e particulados presentes na coluna de água durante certo período de tempo, e que contribuem sobremaneira para que ocorram modificações nas propriedades óticas.

O conjunto de equações que abrangem o estudo destas propriedades são denominados algoritmos bio-óticos (Smith e Baker (1978); Clark (1981)), que representam uma medida do efeito resultante dos processos biológicos em consonância às propriedades óticas das águas em ambientes naturais. Diferentes materiais interferem no comportamento observado nas propriedades óticas do meio aquático, dentre estes Mobley (1984) destacou os materiais em suspensão, e mesmo que os organismos microscópicos também sejam constituintes dos materiais em suspensão, o termo é utilizado para representar somente o material de natureza inorgânica observando que as partículas inorgânicas apresentam um índice de refração, em muitos casos, superior se comparadas às partículas orgânicas.

Outra análise interessante é o comportamento de absorção da água, nela o coeficiente de absorção é muito pequeno na região visível do espectro eletromagnético, se elevando de maneira gradativa na região do vermelho e mais intensamente na região do infravermelho próximo. Em contrapartida, o coeficiente de espalhamento da água, entre 400 e 600 nm, tem um comportamento inverso, onde a água pura apresenta um elevado coeficiente de espalhamento na região de comprimentos de onda mais curtos, representadas principalmente pelo azul, que decresce exponencialmente com aproximadamente λ^{-4} .

Para Moraes (2005), o comportamento espectral de determinado objeto é definido em função do conjunto dos valores sucessivos da sua reflectância no espaço composto pelo espectro eletromagnético, também conhecido como a assinatura espectral. A assinatura espectral do objeto define as feições deste, sendo que a forma, a intensidade e a localização de cada banda de absorção é o que caracteriza o objeto. Especificamente, o comportamento espectral da água, é caracterizada por apresentar baixos valores de radiância, onde apenas uma pequena parte medida pelo sensor possui informações referentes à água pura, estas compreendidas principalmente na faixa espectral que corresponde a radiação fotossinteticamente ativa.

A capacidade de diferenciação entre as características singulares dos objetos na terra, está vinculada ao potencial radiométrico de cada sensor. Dentre as plataformas imageadoras já lançadas pela terra, encontra-se o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), considerado por Justice et al. (1998), como uma das mais importantes fontes de informação para pesquisas em mudanças temporais de diferentes tipos de cobertura do solo, expansão e uso agrícola, crescimento de áreas urbanas e outras modalidades de estudos em diferentes áreas, sendo isto resultado do grande acervo histórico disponibilizado para auxiliar o desenvolvimento de estudos vinculados à evoluções temporais na terra.

O sensor MODIS (tabela 2.1) é um instrumento desenvolvido pela GSFC (*Goddard Space Flight Center*) da NASA, operando em 36 canais espectrais de comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm e resolução espacial de 250 a 1.000 m. O sensor MODIS também se encontra a bordo do satélite TERRA (projeto anterior lançado em 1999), onde os dois instrumentos passam a adquirir imagens da Terra com resolução temporal de 1 a 2 dias. As informações orbitais fornecem uma base sistemática de dados importantes para elaboração de diferentes produtos que observam as interações entre atmosfera, terra e oceano (INPE, 2019). A utilização deste sensor passou a ampliar a qualidade cartográfica temática e a qualidade nos níveis de codificação remota, elevando sobremaneira sua resolução temporal para o monitoramento da superfície terrestre.

A NASA (2019) descreve que o MODIS é um dos 06 instrumentos de aquisição de informações a bordo da plataforma AQUA, ao lado do *Atmospheric Infrared Sounder* (AIRS), *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU-A), *Humidity Sounder for Brazil* (HSB), *Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS* (AMSR-E) e *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES).

O AQUA é uma plataforma norte americana lançada no ano de 2002 e desenvolvida em parceria com Brasil e Japão, fazendo parte do EOS (*Earth Observation System*), programa

Instituições responsáveis	NASA
País/Região	EUA, Japão e Brasil
Plataforma	AQUA + EOS PM-1
Lançamento	04/05/2002
Local de lançamento	Vandenberg Firing Range
Situação atual	Ativo
Órbita	Polar, Circular, Heliossíncrona
Altitude	705 km
Inclinação	98.2°
Período de duração da órbita	99 min
Período de revisita	1 a 2 dias

Tabela 2.1 – Características gerais do satélite AQUA.
Fonte: INPE (2019).

fundado pela NASA e objetivava realizar o monitoramento de fenômenos físicos referentes à circulação da energia e da água na Terra. Os sensores que operam no satélite fornecem de maneira diária grandes quantidades de informações referentes às interações que ocorrem entre a atmosfera, oceano e continente. Alguns parâmetros podem ser obtidos a partir de informações provenientes do AQUA, a exemplo do fluxo de energia radiante, aerossóis, uso e cobertura do solo, matéria orgânica dissolvida nos oceanos e temperatura da água (NASA, 2019).

2.6.1. Sensoriamento remoto para estudos sedimentares

Os estudos referentes ao uso de informações orbitais para caracterização de sedimentos suspensos são amplamente difundidos no meio acadêmico, nos quais, a busca por condições que estabeleçam sua quantificação de maneira direta ou indireta. Deve-se observar que os sedimentos possui dinâmica que impede a elaboração métodos ou calibrações de um modelo que abranja uma grande área, haja vista sua elevada variabilidade espacial e temporal.

Neste caso, os estudos regionais apresentam condições mais satisfatórias e estabelecem relações de quantificação de acordo com as singularidades locais. Deste modo, o sensoriamento remoto é amplamente utilizado em inúmeros casos para avaliação da concentração de sedimentos em suspensão em ambientes aquáticos, além da variabilidade a partir de uma possível correlação com a reflectância, nos comprimentos de onda do visível e no infravermelho próximo (Alfoldi, 1982).

Para Jensen (2000), as pesquisas referentes à avaliação do comportamento ótico das águas que apresentam sedimentos em suspensão com concentração de argila e silte descrevem que a reflectância espectral diminui continuamente depois dos 580 nm, em função da absorção pela coluna de água. Em contrapartida, com a elevação da concentração de sedimentos, a reflectância aumenta em todos os comprimentos de onda para ambos, argila e silte, descrevendo portanto, que o corpo de água com sedimentos em suspensão geralmente pode aparecer brilhando mais na imagem se comparado à água que não apresenta sedimentos em suspensão que compõem as plumas.

O mesmo autor observou em seu estudo as características inerentes do espectro de reflectância em dois tipos de solos de Nebraska, e de amostras de sedimentos em suspensão na água, verificando que o aumento da concentração de minerais em suspensão em corpos de água fica evidenciado na faixa do visível e no infravermelho próximo em porções do espectro.

A utilização dos componentes de reflectância para determinação da concentração de sólidos em suspensão nos ambientes costeiros e continentais, visando avaliação do comportamento de plumas, qualidade das águas ,etc., tem sido amplamente estimada por modelos empíricos, através do uso de diferentes sensores orbitais, a exemplo dos sensores ETM/Landsat (Zhang et al., 2014), TM/Landsat (Montanher et al., 2014) e MODIS/Terra (Petus et al., 2010). Apoiados no estudo da região do espectro eletromagnético presente na faixa do vermelho e do infravermelho próximo, quando a concentração de sólidos é elevada, as componentes de reflectância são mais utilizadas nesses modelos por serem mais sensíveis ao material em suspensão.

Os autores Shi e Wang (2009) destacaram que o processo de entendimento da dinâmica espacial e temporal dos sólidos em suspensão, através de parâmetros como, velocidade, direção, composição e concentração é importante para gerenciamento de ecossistemas aquáticos, observando que o monitoramento *in situ* nestes ambientes disponibiliza elevada precisão. Contudo, estas informações são dispostas de maneira restrita no espaço e tempo, inviabilizando a avaliação de grandes extensões ou pesquisas de forma sistemática.

O estudo de sedimentos suspensos engloba pesquisas relacionadas às plumas continentais, que podem ser classificadas como fluviais e estuarinas. Nas fluviais existe domínio da descarga do rio sobre os efeitos de marés, resultando em uma liberação direta de água doce continental em direção ao mar. No outro caso, os efeitos das marés no estuário promovem misturas da maior parte da água e sedimentos provindos da drenagem continental (Mann e Lazier, 1991).

Os dois tipos de plumas poderão ocorrer associados a um estuário devido às variações de descarga e amplitudes de maré. A composição dos sedimentos que resultam na formação de plumas em estuários varia notadamente de acordo com a cobertura e uso do solo na bacia de drenagem, e as condições físico-químicas do complexo como: pH e salinidade, e atividades realizadas, como pesca e navegação. Existe uma grande variedade de matéria orgânica, nutrientes para diversos organismos, sólidos inorgânicos, além de possíveis poluentes, como metais pesados adsorvidos (Esteves, 2008).

Para Mann e Lazier (2010), a interação da água doce com os processos costeiros, e o aporte de materiais podem contribuir para a manutenção de ambientes favoráveis à reprodução e desenvolvimento de espécies, sustentando padrões de transporte ou deposição de materiais. Muitos estudos apresentaram evidências da influência da descarga provenientes dos rios na intensificação das atividades biológicas, e manutenção dos estoques pesqueiros em estuários e zonas costeiras.

A partir do que foi exposto, e da ampla cobertura da costa brasileira, Lo e Yeung (2007) destacaram particularmente o sensoriamento remoto como ferramenta que passou a adquirir, nas últimas décadas, grande aceitação no meio acadêmico em função do acesso a *hardwares*, *software* e produtos gratuitos como as imagens de satélites, aspectos interferométricos, entre

outros.

Diferentes estudos abordam a avaliação da dinâmica de sólidos suspensos na coluna de água através do uso de informações orbitais. Tais pesquisas avaliam principalmente a caracterização de plumas costeiras e realização de inferências acerca dos parâmetros físico-químicos da água, dentre os quais é possível destacar o estudo realizado por Mendes et al. (1990). Neste estudo, os autores buscaram realizar estimativas referentes à qualidade da água no estuário da Lagoa dos Patos através de informações do sensor TM acoplado ao Landsat 5, abordando 3 principais parâmetros: transparência, sólidos em suspensão e salinidade.

O estudo contou com levantamentos realizados *in situ*, que foram dispostos em um modelo linear de regressão (simples e múltipla) que observava os parâmetros encontrados em campo aliados à assinatura espectral localizadas na imagem. Mendes et al. (1990) confirmaram a viabilidade no uso de imagens multi-espectrais para estudos em corpos de água e observaram que o monitoramento destes parâmetros podem ser realizados em áreas extensas de maneira rápida e econômica. Além disso, o estudo atestou que o uso do sensoriamento remoto na área estuarina da Lagoa dos Patos desempenhou utilidades indiscutíveis, ressaltando a necessidade do aprimoramento de técnicas para melhor definição dos parâmetros empregando informações orbitais.

Relacionado aos estudos referentes à plumas costeiras, merecem destaque os trabalhos realizados por Shi e Wang (2009), que abordavam o uso do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para avaliação na formação de plumas durante eventos de intensas chuvas ao longo do rio Mississipi durante a primavera de 2008. Neste estudo, os autores encontram intensificações na formação de plumas durante o evento, onde sua área chegou a ser o dobro se comparadas aos registros de 6 anos anteriores e interferências significativas nas propriedades ópticas das bandas de absorção localizadas na região do vermelho e infravermelho próximo. Os autores observaram deste modo, a participação de fatores atmosféricos como agentes preponderantes na formação de plumas costeiras, além da intensa variabilidade sazonal às quais as formações de plumas estão sujeitas dentro de uma mesma estação.

As pesquisas realizadas por Petus et al. (2010) destacaram a utilização do sensor MODIS 250-m para a quantificação de material suspenso e a avaliação de plumas no sul do golfo da Biscaia, destacando a influência das plumas de influencia fluvial para deposição de sedimentos no mar. Analisando as diferentes variações destas plumas estacionalmente, os autores destacaram a importância da geração de algoritmos regionais para estudos em diferentes ambientes estuarinos, observando as características singulares de cada ambiente ao longo do globo. Como conclusão, constatou-se a importância do uso de informações orbitais associadas à modelos numéricos para representação das plumas, apoiadas na análise de reflectância em diferentes resoluções radiométricas para determinação de bandas com maior eficiência para descrever o comportamento das plumas.

Outros estudos que abordam a utilidade das informações numéricas aliadas aos dados de sensores remotos são encontradas em pesquisas realizadas por Marques et al. (2009), que debateram o uso de um modelo numérico para determinação das plumas costeiras da Lagoa

dos Patos e as principais forçantes físicas para formação destas plumas. No estudo, os dados provenientes do MODIS foram utilizados para verificar qualitativamente a resposta da pluma costeira estimada numericamente, sendo utilizados dados em formato HDF e nível 1A de processamento, processados no *software* SEADAS (*SEaWIFS Analysis System*) para geração de arquivos de radiâncias calibradas, em nível 1B de 250, 500 e 1 km de resolução. As informações cruzadas entre dados do modelo de ventos e imagens orbitais denotam influências sinóticas no comportamento das plumas próximas à linha de costa, associadas aos sistemas frontais observados na área de estudo, descrevendo que as condições de vento influenciam no processo de resuspensão de material sedimentar em direção à costa.

Avaliações feitas em deltas fluviais para caracterização de plumas e concentração de sólidos suspensos utilizando técnicas de sensoriamento remoto são descritos em estudos feitos por Pavelsky e Smith (2009), o qual visava determinar a quantidade de material suspenso no delta do lago Athabasca, utilizando informações *in situ*, imagens ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) para quantidade de material suspenso na água, e MODIS para avaliação da reflectância dos lagos de várzea. O estudo encontrou maiores saturações sedimentares associadas a elevadas condições de vazão nos rios que abastecem o lago, além de encontrar fortes evidências de que os intervalos localizados no infravermelho próximo representavam melhor as quantidades de sólidos suspensos na água.

Com o mesmo objetivo, de determinar a quantidade de materiais suspensos em ambientes dulcícolas, Montanher et al. (2013) buscaram o desenvolvimento de algoritmos para quantificação de material suspenso na região amazônica, apoiado em imagens do sensor Landsat-5, trabalhando nos intervalos correspondentes à reflectância do infravermelho próximo, testando modelos lineares uni-variados e multi-variados. O modelo empírico gerado apresentou bons resultados ante a validação cruzada, e um modelo para o rio Amazonas foi gerado sem dados *in situ*. A série para este dado corrobora com a qualidade de informações geradas perante o modelo para outras regiões da mesma bacia.

Os autores descreveram que as críticas realizadas aos modelos empíricos não necessariamente podem ser generalizadas, demonstrando que os modelos podem ser aplicados em outras imagens sem amostras *in situ*, gerando bons resultados para quantificação da concentração de sólidos em suspensão na região. As informações identificadas nos trabalhos observados corroboram com as ponderações feitas por Novo (2001), que identificaram que a faixa localizada do vermelho ao infravermelho próximo é mais comumente utilizada nos estudos com esta finalidade, já que as partículas em suspensão provocam um aumento da refletância da água com o aumento da concentração o máximo de reflectância ocorre em 500 e 700 nm.

Para Bicalho (2006), os processos de produção e deposição sedimentar ao longo de uma determinada bacia hidrográfica é considerado um fenômeno natural, porém este passa a ser potencializado por ações antrópicas, sendo o desmatamento, atividades mineralógicas, construções civis e manejo inadequado de atividades agrícolas os principais fatores que influenciam na dinâmica dos materiais de origem terrígena.

A concentração destes sedimentos suspensos (CSS) que originam as plumas costeiras,

é caracterizada por Montanher et al. (2013) como um parâmetro importante para a biota em ecossistemas aquáticos, além de interferir em diversos problemas de engenharia, como no assoreamento em reservatórios. Estes sedimentos em suspensão também funcionam como indicadores da ação de processos geomorfológicos em bacias de drenagem.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido utilizando um modelo regionalizado, objetivando caracterizar a hidrodinâmica do transporte sedimentar da pluma do Canal São Gonçalo no estuário da Lagoa dos Patos e regiões adjacentes (Fig. 3.1). Para isso, foi utilizado o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D, além de imagens orbitais do satélite AQUA. Estas últimas foram empregadas na construção de um modelo polinomial regional de reflectância, no intervalo de comprimento de onda que corresponde ao infravermelho próximo, a fim de quantificar a concentração de sólidos em suspensão. Posteriormente, as concentrações obtidas foram empregadas na validação do modelo numérico.

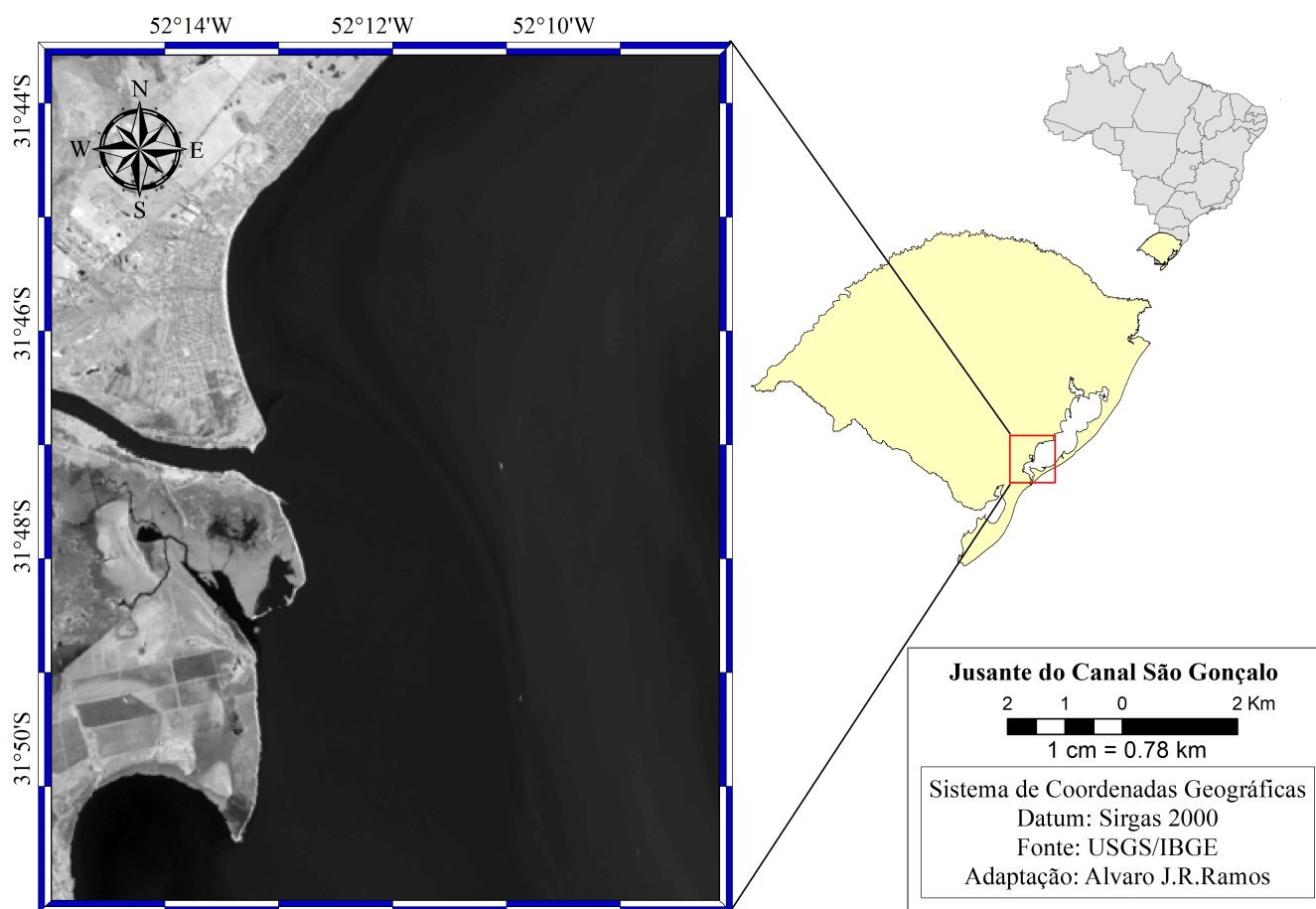


Figura 3.1 – Área de estudo.

3.1. Modelagem utilizando o sistema TELEMAC

O modelo numérico TELEMAC-3D é o módulo hidrodinâmico tridimensional da suíte de modelagem Open TELEMAC-MASCARET (www.opentelemac.org). Suas aplicações se dão

sobretudo em estudos que envolvem os processos hidrodinâmicos tridimensionais de fluxos com superfícies livres de rios, estuários, regiões costeiras e oceânicas. Por utilizar o método de solução por elementos finitos, é um modelo especialmente eficaz para sistemas compartimentalizados, tais como a região abordada no presente estudo, composta por região costeira adjacente, estuário e porção lagunar. Isso porque esse método permite uma caracterização detalhada das linhas de costa e das isóbatas batimétricas, e a maximização do tempo computacional.

3.1.1. Equacionamento geral do modelo

O TELEMAC-3D soluciona as equações de Navier-Stokes aplicando o método dos elementos finitos para posterior representação espacial e reprodução vertical, acompanhando assim os limites superficiais e de fundo dos corpos hídricos Hervouet (2007). O modelo resolve equações como a do fluxo de superfície livre (considerando ou não a hipótese da pressão hidrostática) e do método de transporte-difusão, equações de quantidades intrínsecas (temperatura, salinidade, concentração). Os principais resultados, em cada ponto na malha, são a velocidade em todas as três direções e as concentrações de quantidades variáveis transportadas.

O modelo resolve as equações hidrodinâmicas tridimensionais com as informações descritas em Hervouet (2007) presentes nas equações de continuidade (3.1), considerando as equações tridimensionais da quantidade de movimento de Navier-Stokes com uma superfície livre mudando no tempo (equação 3.2) e hipótese de pressão hidrostática e aproximação de Boussinesq para a quantidade de movimento (Eq. 3.3). Nesta situação, as variações de densidade são desprezadas, constando no termo gravidade.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} &= -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \nu \Delta(U) + F_x \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} &= -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \nu \Delta(V) + F_y \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (Z_s - z) + \rho_0 g + \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (3.3)$$

Onde, h (m) é a profundidade da água, S (m) elevação de superfície livre, U , V , W (m/s) componentes tridimensionais da velocidade, p (X) pressão, p_{atm} (X) pressão atmosférica, g (m / s²) aceleração da gravidade, ν (m²/s) coeficientes de difusão do traçador, Z_f (m) profundidade do fundo, ρ_0 (X) densidade de referência, $\Delta\rho$ (X) variação da densidade, t (s) tempo, x , y (m) componentes do espaço horizontal, z (m) componente de espaço vertical, F_x , F_y (m/s²) termos fonte. Neste sistema, h , U , V , W e são as grandezas desconhecidas, e calculadas pelo modelo. Nesta situação, F_x e F_y são termos de fonte que denotam o vento, a força de Coriolis e a fricção de fundo.