

Artigos

O fluxo da água subterrânea no sistema aquífero costeiro associado aos depósitos eólicos holocênicos na região do Cassino/RS

The groundwater flow in the coastal aquifer system associated with holocenic wind aeolian deposits in the Cassino/RS region

Eliege Alves do Nascimento¹; Eduardo Guimarães Barboza¹; Pedro Antonio Roehe Reginato¹; Maria Luiza Correa da Câmara Rosa¹; Rosalia Barili²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS.

² Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, RS.

✉ eliege.an@hotmail.com, eduardo.barboza@ufrgs.br, pedro.reginato@ufrgs.br, luiza.camara@ufrgs.br, rosalia.barili@gmail.com

Palavras-chave:

Fluxo de água subterrânea;
Hidrogeologia;
Aquíferos costeiros.

Keywords

Groundwater flow;
Hydrogeology;
Coastal aquifer.

Revisão por pares.
Recebido em: 03/12/2022.
Aprovado em: 03/04/2023.

Resumo

O comportamento do fluxo da água subterrânea em aquíferos costeiros pode ser influenciado localmente por fatores geológicos, geomorfológicos, topográficos, hidrogeológicos, climáticos e antrópicos. Esse trabalho tem como objetivo avaliar o sentido de fluxo da água subterrânea associado ao pacote de sedimentos eólicos e que fazem parte do Sistema Aquífero Costeiro (SAC) presente na região do Cassino/RS. Foram levantados e analisados dados já existentes de sondagens, poços de monitoramento e variações mensais dos níveis de águas. Também foram executados levantamentos de georadar que possibilitaram melhorar a avaliação da espessura e da geometria das camadas dos depósitos sedimentares que ocorrem em subsuperfície. Os resultados permitiram caracterizar as litologias encontradas, analisar o comportamento das variações dos níveis estáticos e da potenciometria, identificar a arquitetura deposicional dos estratos em subsuperfície e delimitar os depósitos sedimentares. A partir dos resultados foi identificado que a morfologia do terreno, as características texturais e geotécnicas dos depósitos sedimentares e o padrão de empilhamento estratigráfico das camadas são fatores que condicionam localmente os sentidos de fluxo do aquífero associado ao pacote eólico. Portanto, esse estudo contribuiu significativamente no aumento do conhecimento hidrogeológico da região e demonstrou que o fluxo de água, mesmo em regiões próximas à linha de costa, pode ocorrer em diferentes sentidos.

Abstract

The flow behavior in coastal aquifers can be influenced locally by geological, geomorphological, topographic, hydrogeological, climatic, and anthropic factors. This paper aimed to evaluate the direction and controls of the groundwater flow linked to aeolian sediment layers, which are part of the Coastal Aquifer System (SAC) present in the Cassino/RS region. Drill holes, water levels, and ground penetrating radar surveys were applied. The results allowed us to characterize the lithologies, analyze the variability of static levels and flow power metrics, and identify the depositional architecture. As result, it was possible to identify that terrain's morphology, texture, and geotechnical characteristics of the sedimentary deposits, and the stratigraphic stacking pattern of layers are the factors that locally determine the aquifer's flow. This study contributed to the hydrological knowledge in the region and demonstrated that the water flow, even in regions nearby the coastline, may behave in variable directions.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i3.30202>

1. INTRODUÇÃO

O estudo de aquíferos costeiros é de suma importância, pois em regiões litorâneas o uso de água subterrânea para o consumo humano e atividades ligadas à agricultura, indústria e comércio é expressivo, sendo que a demanda por esse recurso hídrico tem aumentado significativamente em consequência do crescimento populacional dessas áreas (CHANDRAJITH *et al.*, 2014). A maioria dos estudos desenvolvidos estão relacionados apenas com a avaliação hidrogeológica quantitativa e qualitativa (CAVALCANTI; MONTENEGRO, 2009; TROIAN *et al.*, 2020; TEDESCO *et al.*, 2021; CHAVES *et al.*, 2022;) sendo muitos deles associados exclusivamente na identificação e análise da cunha salina

(OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O conhecimento e a avaliação sobre o fluxo da água subterrânea em aquíferos costeiros também possuem grande relevância para subsidiar os processos de gerenciamento hídrico. O fluxo de água nos aquíferos é governado pelo gradiente hidráulico, sendo que nos aquíferos costeiros o gradiente existente propicia uma circulação regional e preferencial da água subterrânea, que ocorre do continente para o oceano (MANOEL FILHO, 2008). Entretanto, a intrusão da cunha salina pode gerar um gradiente, sendo este direcionado para o continente (BARLOW, 2003). Além do mais, o fluxo de água subterrânea pode ser influenciado localmente por diversos fatores, tais como: geológicos/geomorfológicos

(espessuras, geometrias e estruturas das camadas, granulometria, grau de consolidação dos sedimentos e formas de relevo), topográficos (variações altimétricas da superfície do terreno), hidrogeológicos (variações nos processos de recarga), climáticos (precipitação pluviométrica), antrópicos (exploração da água subterrânea sem controle), entre outros.

O estudo realizado por Rocha, Andrade e Niencheski (2015) avaliou a descarga de água subterrânea (DAS) na região norte do litoral do Rio Grande do Sul (RS), tendo identificado que o fluxo é influenciado pelos processos de infiltração e advecção que ocorrem entre a região da encosta (Serra Geral) e da planície costeira. Os autores identificaram uma relação entre os aquíferos e as lagoas, com uma contribuição significativa da descarga da água subterrânea para as lagoas. Em continuidade a esses estudos, Rocha (2018) e Rocha *et al.* (2018) avaliaram as conexões e as interações entre a água superficial e subterrânea no litoral norte do RS. Nesses estudos foi identificado que a DAS é influenciada por diferentes fatores, sendo um deles o comportamento geológico (padrões de empilhamento estratigráfico progradacional e retrogradacional) dos depósitos sedimentares que formam as barreiras costeiras. Além disso os autores evidenciaram que as variações na compactação, na estrutura, na granulometria e nas discontinuidades das camadas tem influência nos processos de descarga da água subterrânea, bem como no transporte de nutrientes.

Na região sul do litoral do RS, no Balneário do Cassino (Rio

Grande/RS), o sistema aquífero costeiro tem grande importância como área de captação de água, porém os estudos hidrogeológicos são mais escassos e de escala regional, como por exemplo os realizados por Hausman (1995) e Machado & Freitas (2005). Um estudo mais detalhado foi desenvolvido por Nascimento (2013), que avaliou as características hidrogeológicas e hidroquímicas da camada aquífera associada aos depósitos holocênicos existentes na região. Porém, esse estudo abordou de forma muito preliminar as condições de fluxo da água subterrânea.

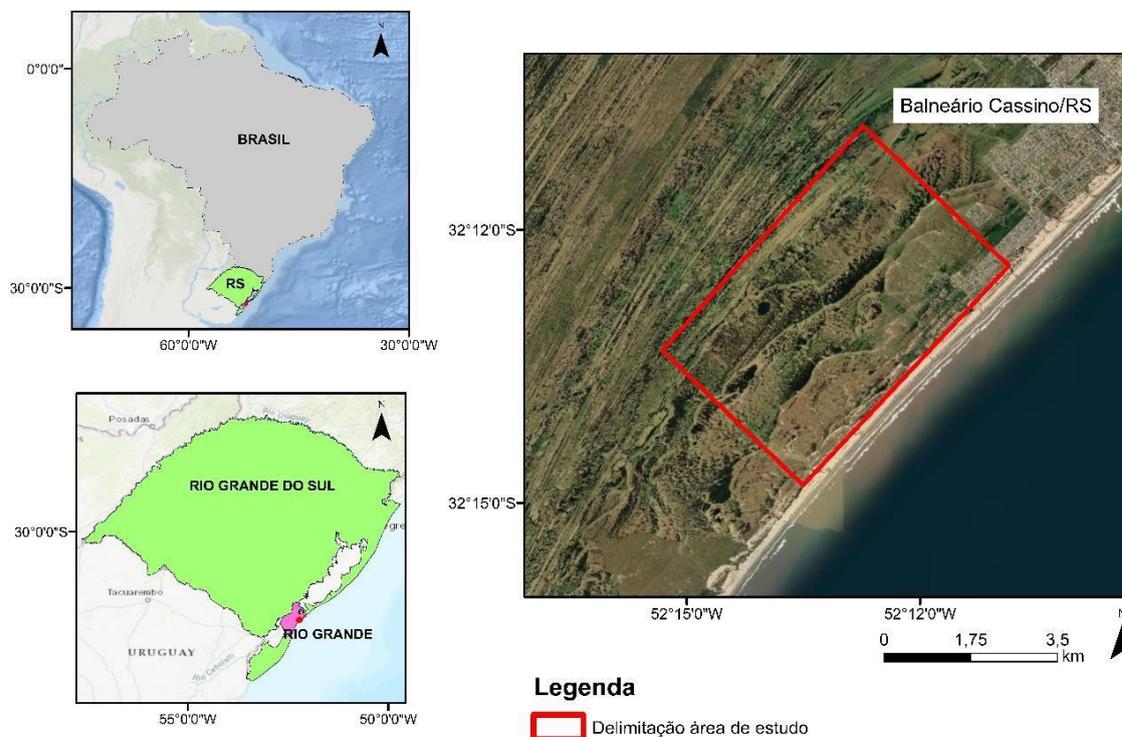
Em relação ao fluxo da água subterrânea há vários fatores (topográficos, geológicos, hidrogeológicos, hidrológicos) que podem ter influência, por isso em regiões costeiras, mesmo próximo à linha de costa, há possibilidade de ocorrência de fluxos em sentido divergente ao oceano.

Nesse contexto, é apresentado um estudo hidrogeológico com avaliação do fluxo de água do sistema aquífero costeiro associado às camadas representadas pelo sistema deposicional eólico, bem como a identificação dos fatores que condicionam esse fluxo.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada na porção sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, em uma área pertencente ao Balneário Cassino, município de Rio Grande/RS. (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo situada no Balneário Cassino, município de Rio Grande/RS (ESRI® Basemap).



A área de estudo está inserida geologicamente no Sistema Depositional Laguna-Barreira IV (VILLWOCK *et al.*, 1986), formado durante os últimos 7.000 anos a 6.000 anos

(DILLENBURG; BARBOZA, 2014), com o nível do mar em torno de 2 m acima do atual até 3.000 anos antes do presente, quando então entrou em queda até o nível atual (BARBOZA;

TOMAZELLI, 2003; BARBOZA *et al.*, 2021). A Barreira IV, na região do Cassino, apresenta um padrão de empilhamento estratigráfico que permite classificá-la como prográdante (regressiva), ou seja, seu crescimento ocorre no sentido do oceano (DILLENBURG *et al.*, 2017).

A sucessão vertical de fácies apresenta depósitos de plataforma rasa na base, sucedidos por depósitos de antepraia e no topo por depósitos de pós-praia e de estirâncio (CLEROT *et al.*, 2003). Os depósitos eólicos formados por dunas e por lençóis de areias transgressivos, objeto desse estudo, são compostos por areias quartzosas finas, bem selecionadas e arredondadas, e apresentam raras laminações plano-paralelas e cruzadas (DILLENBURG *et al.*, 2017).

Quanto ao contexto hidrogeológico, Nascimento (2013) realizou um estudo com o objetivo de caracterizar a unidade aquífera Barreira Holocênica na região do Cassino, Rio Grande/RS. Nessa região, a unidade apresentou uma espessura de aproximadamente 20 m e o aquífero exibiu dois comportamentos distintos, livre e semi-confinado, sendo esse último influenciado pela intercalação de lentes de argila em camadas mais profundas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Revisão bibliográfica e obtenção de dados existentes.

A revisão bibliográfica sobre o fluxo de água subterrânea e os estudos realizados para na região forneceram um arcabouço acerca do conhecimento da hidrogeologia local. Além disso, um inventário e um cadastramento dos poços de monitoramento existentes na área de pesquisa foram elaborados. Dados construtivos dos poços, perfis litológicos e dados de monitoramento dos níveis d'água realizados durante 11 meses consecutivos, foram cedidos pela empresa que elaborou os estudos para o licenciamento do parque eólico Cassino. Também foram obtidos perfis geológicos de sondagens (SPT) executadas na área (DILLENBURG *et al.*, 2017).

Dados dos índices pluviométricos foram obtidos por meio do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o município de Rio Grande, para os meses de monitoramento dos níveis de água dos piezômetros.

3.2. Aquisição de dados geofísicos (GPR), processamento e interpretação.

Para o reconhecimento do padrão de empilhamento estratigráfico e a espessura das camadas dos depósitos sedimentares, foi utilizado o método geofísico de georadar (GPR).

O equipamento utilizado na aquisição dos dados é um modelo SIR-3000 da empresa GSSI™ (Geophysical Survey Systems, Inc.) acompanhado de antenas aéreas em um arranjo bi estático, operando com antenas de frequências centrais de 124 MHz, ambas fabricadas pela Radarteam Sweden AB. O

método de levantamento utilizado de acordo com o arranjo das antenas foi o modo *Common Off Set* que consiste em duas antenas (uma transmissora e outra receptora) posicionadas a uma distância de 1 m, que se deslocam simultaneamente no mesmo sentido. Durante a aquisição o Sistema GPR foi conectado a um receptor GNSS no modo cinemático, gerando um arquivo de posicionamento espacial, permitindo a obtenção de informações para o georreferenciamento das seções através do método do posicionamento diferencial. Os dados de posicionamento foram coletados com um sistema Trimble® PROXRT (datum: WGS84) pelo método pós-diferencial (DGNSS), com correção efetuada pela base da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), utilizando-se a base de Pelotas. Os parâmetros utilizados na aquisição dos perfis de GPR seguiram os propostos por Barboza, Rosa e Caron (2014). Durante a aquisição foram aplicados filtros de ganho e de frequência de sinal para eliminação de ruídos e correção da saturação (passa-bandas). A constante dielétrica utilizada durante a aquisição foi a de valor 10 conforme associação com os furos de sondagem (DILLENBURG *et al.*, 2011 e DILLENBURG *et al.*, 2017).

Os dados foram pós-processados através dos softwares Radan™ (GSSI – Geophysical Survey Systems, Inc.), Reflex-Win® (Sandmeier Geophysical Research) e Prism2® (Radar Systems, Inc.), aplicando filtros de remoção de ruídos de fundo, passa-bandas, de ganho, da correção topográfica e da conversão de tempo em profundidade. A constante dielétrica utilizada para a conversão de tempo em profundidade foi a de valor 10, representando a velocidade de 0,12 m/ns (DANIELS *et al.*, 1995). A constante dielétrica foi validada a partir de dados litológicos obtidos através dos furos de sondagem na área, conforme proposto por Dillenburg *et al.* (2011) e Dillenburg *et al.* (2017). Na correção topográfica foram utilizados os dados de GNSS pós-processados, aplicou-se o intervalo de 1 s de amostragem, com uma precisão de 0,2 m.

As interpretações desses dados foram feitas com base nos princípios da sismoestratigrafia (MITCHUM JR.; VAIL; SANGREE, 1977; VAIL; MITCHUM JR.; THOMPSON III, 1977) adaptado para o GPR por Neal (2004). Foram interpretadas as terminações das reflexões nos limites superiores e inferiores de cada unidade analisando também a geometria externa e configuração interna de cada radarfácies. Para validar a interpretação dos ambientes deposicionais foi aplicada a análise do traço (LEANDRO *et al.*, 2019).

3.3. Caracterização geológica e topográfica

A caracterização geológica do aquífero associado aos depósitos eólicos foi realizada com base nas informações coletadas a partir dos sedimentos amostrados em 32 sondagens do tipo SPT e em 16 poços de monitoramento (piezômetros) localizados na área de estudo. As sondagens foram perfuradas até os 30 m de profundidade e realizadas de acordo com a norma NBR 6484/2001 de execução e para análise de compactação foi adotada a norma NBR 7250/1982 da ABNT.

O grau de compactação foi obtido através do número de golpes necessários para que o martelo de 65 kg, que cai de uma altura de 75 cm de altura, penetre os primeiros e os últimos 30 cm do amostrador padrão no solo determinando assim o índice de resistência à penetração do solo (NSPT). Com esse material foi possível identificar as seguintes informações: NSPT; nível d'água, cotas em relação ao nível de referência escolhido, profundidade das camadas de sedimentos em relação à superfície do terreno e a classificação dos materiais, de acordo com a nomenclatura da NBR 6484/2001.

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Sedimentologia do Centro de Estudo de Geologia Costeira e Oceânica (CECO), utilizando um analisador de partículas a laser Horiba (Modelo LA-950v2) com alíquotas de 5 a 10 gramas de cada amostra da sondagem SPT. Os parâmetros granulométricos (tamanho do grão e seleção média) foram calculados de acordo com Folk & Ward (1957).

Tanto para a caracterização geológica como topográfica foi utilizado também os resultados obtidos através do levantamento da seção de GPR. O mapa topográfico para a área foi gerado com auxílio do software SURFER através da inserção de um banco de dados com as altitudes obtidas através do processamento das altitudes dos piezômetros cedidos pela empresa proprietária. As altitudes inseridas nesse banco de dados foram niveladas pelo método pós-diferencial (DGNS), com correção efetuada pela base da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), utilizando-se a base de Pelotas.

3.4. Caracterização hidrogeológica

A caracterização hidrogeológica do aquífero associado ao pacote de sedimentos eólicos foi realizada com base na interpretação dos dados dos poços de monitoramento e das sondagens existentes na área de estudo.

Para analisar as variações do nível estático foram utilizados os dados de 16 poços de monitoramento. Esse

monitoramento foi realizado durante 11 meses consecutivos pela empresa proprietária do parque eólico do Cassino, com esses dados cedidos para a elaboração desse estudo.

Todos os poços foram nivelados com uso de GPS Diferencial (DGPS) e a referência de nível utilizada para calibração do equipamento e determinação do referencial altimétrico de superfície dos poços foi a RN/IBGE SAT-91715, localizada no Pier da Estação Naval de Rio Grande (RS). Os dados de altitude da boca dos poços e os de nível estático foram utilizados no cálculo das cargas hidráulicas. Com os dados de carga hidráulica foram gerados mapas potenciométricos e de fluxo da água subterrânea. Esses mapas foram gerados com o emprego do software SURFER.

3.5. Avaliação do fluxo e circulação da água subterrânea.

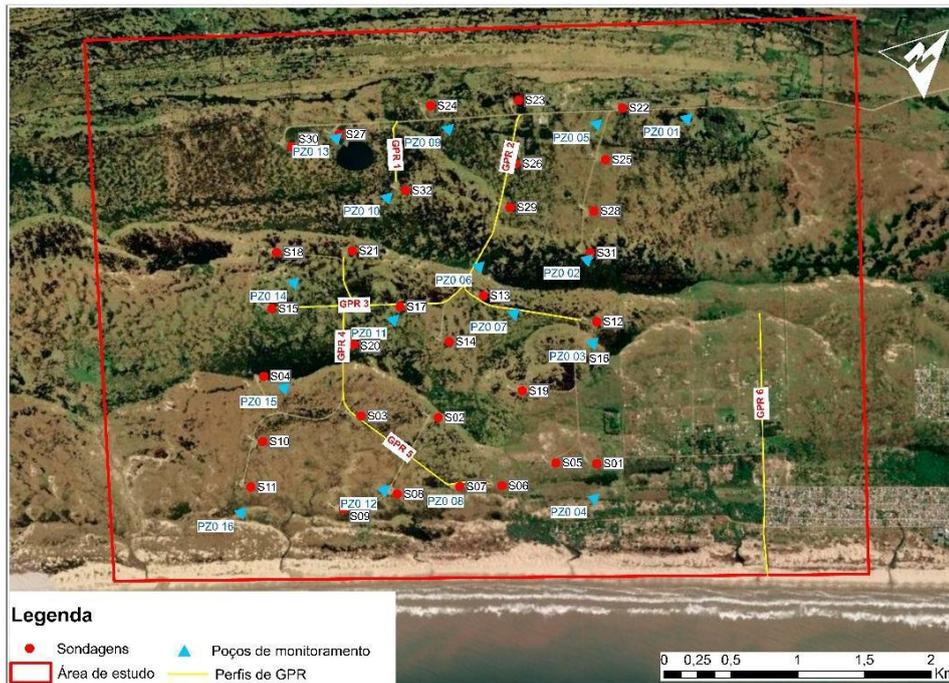
A partir da confecção dos mapas potenciométricos tornaram-se conhecidos os sentidos preferenciais de fluxo da água subterrânea. Essa avaliação foi obtida com a integração dos dados geológicos, perfil geofísico de GPR e hidrogeológicos. Essa integração foi realizada tendo como base os mapas de fluxo de água subterrânea, que foram cruzados com o mapa topográfico para avaliar o efeito da topográfica no fluxo da água. Além disso foi feita uma avaliação do fluxo com as camadas identificadas nos perfis elaborados com o GPR, procurando com isso identificar o efeito do empilhamento ou estruturação das diferentes camadas de sedimentos no fluxo. Com isso foi possível avaliar quais os prováveis fatores que tem influência no fluxo da água subterrânea.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização geológica e morfológica dos depósitos eólicos.

A caracterização geológica e geomorfológica da área de estudo foi realizada a partir da compilação de informações obtidas através das sondagens, dos poços de monitoramento e da interpretação da seção de GPR. A Figura 2 sintetiza a localização de todos os levantamentos realizados.

Figura 2 - Localização das sondagens, poços de monitoramento e perfis de GPR executados na área de estudo (ESRI® Basemap)



O depósito eólico, lençóis de areias transgressivos, é composto por areias quartzosas de granulometria muito fina, fina e média, bem selecionadas e de diferentes colorações (amarela, branca, cinza e cinza esverdeada). O grau de compactação dessa unidade variou de pouca a medianamente compacta.

De acordo com Clerot (2004) e Dillenburg et al. (2017) a principal característica observada na transição dos depósitos eólicos para os depósitos praias está na mudança do grau de compactação dos sedimentos, já que as características texturais dos sedimentos, em ambos os depósitos, são muito parecidas.

Embora o foco desse trabalho seja a unidade eólica (lençóis de areias transgressivos), a profundidade do intervalo analisado foi de 7 m para que fosse possível também observar e delimitar o contato entre a unidade eólica e a praias conforme descrito por Dillenburg et al. (2017).

De fato, a mudança descrita pelos autores foi observada nas variações do grau de compactação. O contato entre os depósitos eólicos e os praias ocorre entre 3 e 5 m de profundidade onde a compactação altera-se de medianamente compacta (entre 9 a 18 golpes para o avanço dos últimos 30 cm de amostrador) para compacta (entre 19 a 40 golpes para o avanço dos últimos 30 cm de amostrador) e coincide com as interpretações feitas através da seção de GPR.

Para ilustrar essas variações e identificar o contato entre os depósitos foram construídas duas seções (Figura 3) mostrando os resultados obtidos através dos ensaios de SPT. Nessa seção foram utilizadas as mesmas sondagens que serão apresentadas na Figura 4.

Na Figura 4 são apresentadas a localização das sondagens utilizadas na construção das seções (ensaios de SPT e geológica) e que são representativas para a área.

Figura 3 - Seções mostrando os resultados obtidos através dos ensaios de SPT. A) Seção das sondagens S11 à S20. B) Seção das sondagens S17 à S22

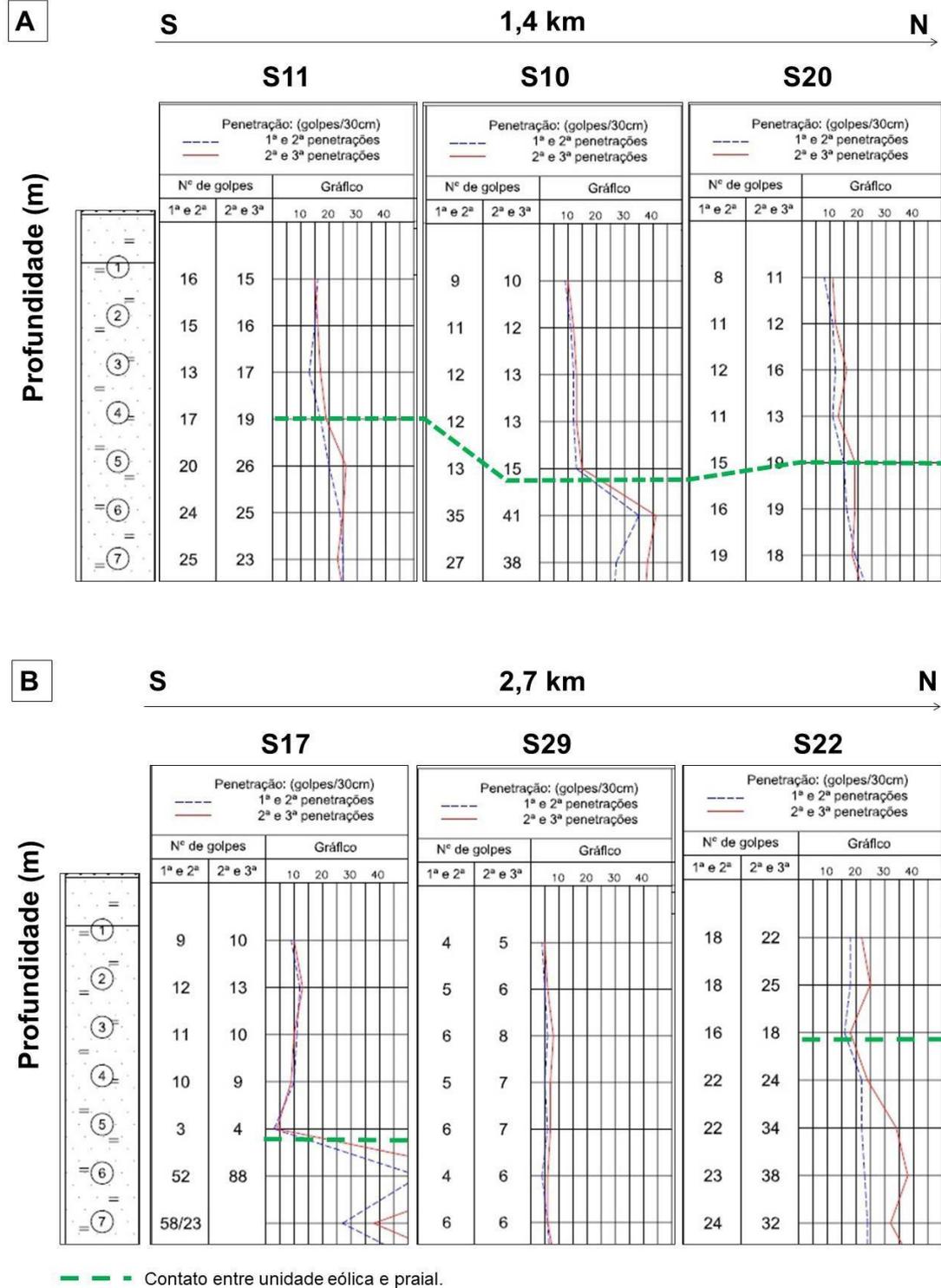
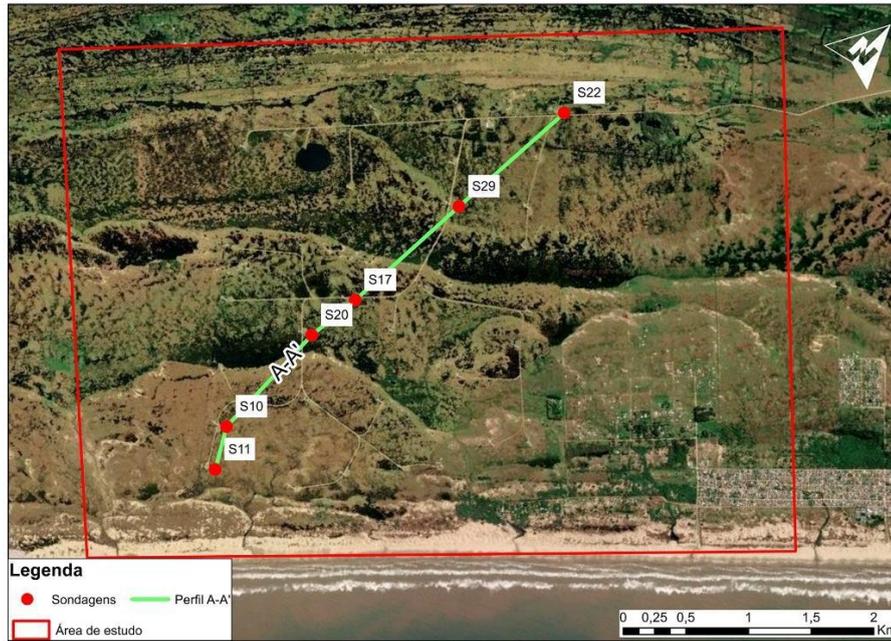


Figura 4 - Localização das sondagens utilizadas na elaboração das seções de compactações e geológica (ESRI® Basemap)

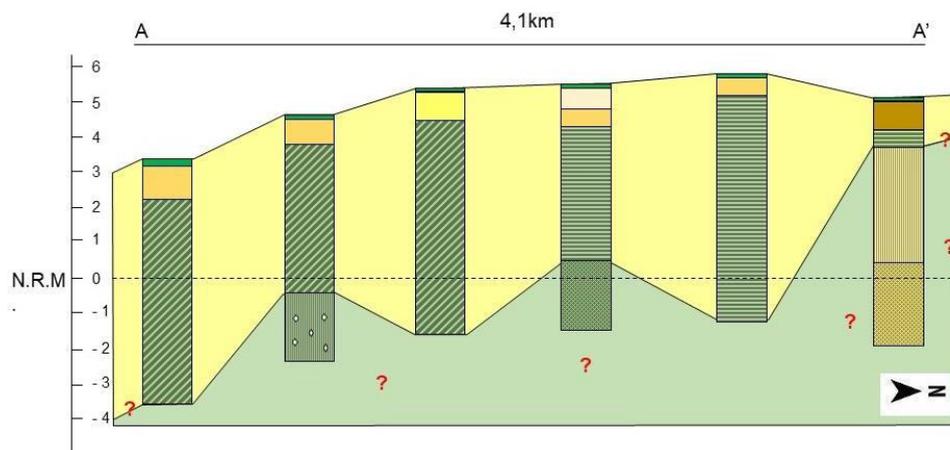


Já na Figura 5 é ilustrada a seção geológica com direção sul/norte, contemplando a correlação litológica entre as sondagens S11, S10, S20, S17, S29 e S22.

compacidade), bem como sua continuidade lateral. A seção escolhida evidencia a variação textural dos sedimentos e os diferentes níveis de compactação encontrados até a profundidade do intervalo analisado de 7 m.

A partir dessa correlação litoestratigráfica é possível avaliar as diferenças entre as camadas de sedimentos (granulometria e

Figura 5 - Seção geológica mostrando a variação textural dos sedimentos e o grau de compactidade para o intervalo analisado



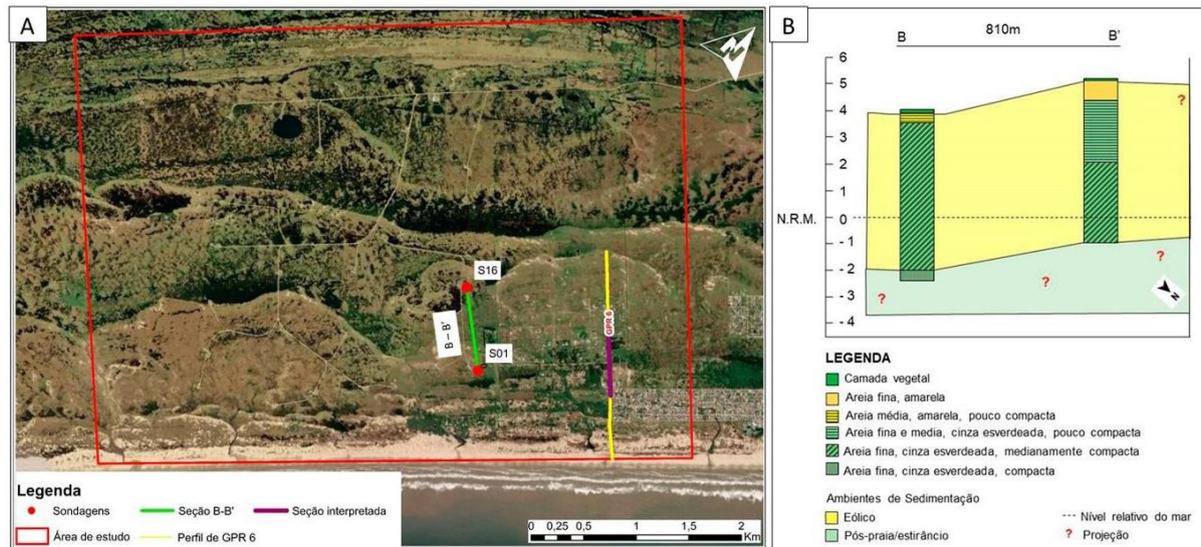
LEGENDA

- | | |
|---|---|
| ■ Camada vegetal | ■ Areia siltosa, cinza e verde, pouco compacta |
| ■ Areia fina, amarela | ■ Argila siltosa com areia média, amarela, rija |
| ■ Areia fina, cinza esverdeada, medianamente compacta | ■ Argila siltosa com areia média, amarela, muito rija |
| ■ Areia fina, com fragmentos de conchas, cinza esverdeada, compacta | |
| ■ Areia fina e média, amarela | Ambientes de Sedimentação |
| ■ Areia fina, branca | ■ Eólico |
| ■ Areia fina, cinza esverdeada, pouco compacta | ■ Pós-praia/estirâncio |
| ■ Areia fina, cinza esverdeada, muito compacta | --- Nível relativo do mar |
| ■ Argila siltosa com areia média, amarela | ? Projeção |

O reconhecimento do padrão de empilhamento estratigráfico das camadas, as espessuras e a interpretação dos ambientes de sedimentação foram definidos através de um perfil de GPR. Para esse trabalho foram adquiridas seis linhas de GPR (GPR 1, 2, 3, 4, 5 e 6) e selecionada apenas uma (GPR 6) levando em consideração ser a mais representativa para o padrão de empilhamento estratigráfico da área.

Para essa interpretação também foi construída uma seção geológica, através das sondagens S01 e S16, a fim de correlacionar lateralmente os perfis litológicos obtidos através das sondagens com o registro da seção de GPR. A Figura 6A apresenta a localização do registro completo e a delimitação da linha processada/interpretada, enquanto a Figura 6B ilustra a seção geológica construída para a correlação lateral entre as duas metodologias.

Figura 6 - Seção geológica e perfil de GPR. A) Localização das sondagens (pontos vermelhos) utilizadas na seção geológica (linha verde) e registro completo de GPR (linha amarela) vs. perfil processado e interpretado (linha lilás) (ESRI® Basemap); B) Seção geológica utilizada na correlação lateral com o perfil de GPR



Na Figura 7A é apresentado o registro geofísico processado. Já na Figura 7B foram delimitadas cada fácies levando em consideração as terminações de refletores, a geometria e o padrão interno das reflexões. Por fim, a interpretação de cada ambiente é apresentada na Figura 7C.

superior apresenta terminações em *toplap*. Por fim, a unidade eólica constituída por dunas frontais e lençóis de areias transgressivos, onde as dunas demonstram reflexões ondulados, descontínuos e com terminações de alto ângulo com inclinações ora para o mar, ora para o continente e os lençóis de areias transgressivos, no topo, formados por reflexões horizontais e subparalelas.

A Figura 7 apresenta uma seção de GPR com 700 m de comprimento, partindo do continente (NW) em direção ao oceano (SE). Foram interpretados da base para o topo 3 ambientes: I - Antepraia Superior; II - Pós-praia/estirâncio e a Unidade eólica representada pelas IIIA - Dunas frontais e IIIB - Lençóis de Areias Transgressivos.

No mapa altimétrico da área de estudo (Figura 8) é possível observar a topografia relativamente plana da região, com amplitude altimétrica de 3,2 m. A maior altitude na área é observada entre dois pontos que estão localizados na porção central da área, alinhados na orientação de NE para SW. Este alinhamento forma um divisor topográfico sinalizado pelo retângulo em vermelho ilustrado na Figura 9. Esse divisor é caracterizado por um empilhamento do sistema eólico associado as fases de lençóis de areias transgressivos.

A Antepraia Superior foi caracterizada por reflexões onduladas, descontínuas e com um padrão caótico (ambiente de alta energia). O Pós-praia/estirâncio apresenta reflexões contínuas, subparalelas com reflexões com inclinação em direção ao oceano. A terminação das reflexões no limite inferior ocorre em *downlap* e no limite

Figura 7 - Seção de GPR. A) Registro de GPR processado; B) Identificação das terminações das reflexões e a delimitação das superfícies (setas verdes representam as terminações em *downlap*, a seta azul representa a terminação em *onlap*, a linha tracejada em preto representa o limite entre as unidades e a linha tracejada em vermelho representa uma superfície erosiva); C) Interpretação dos ambientes: I - Antepraia Superior; II Pós-praia/estirâncio; IIIA/IIIB Unidade eólica

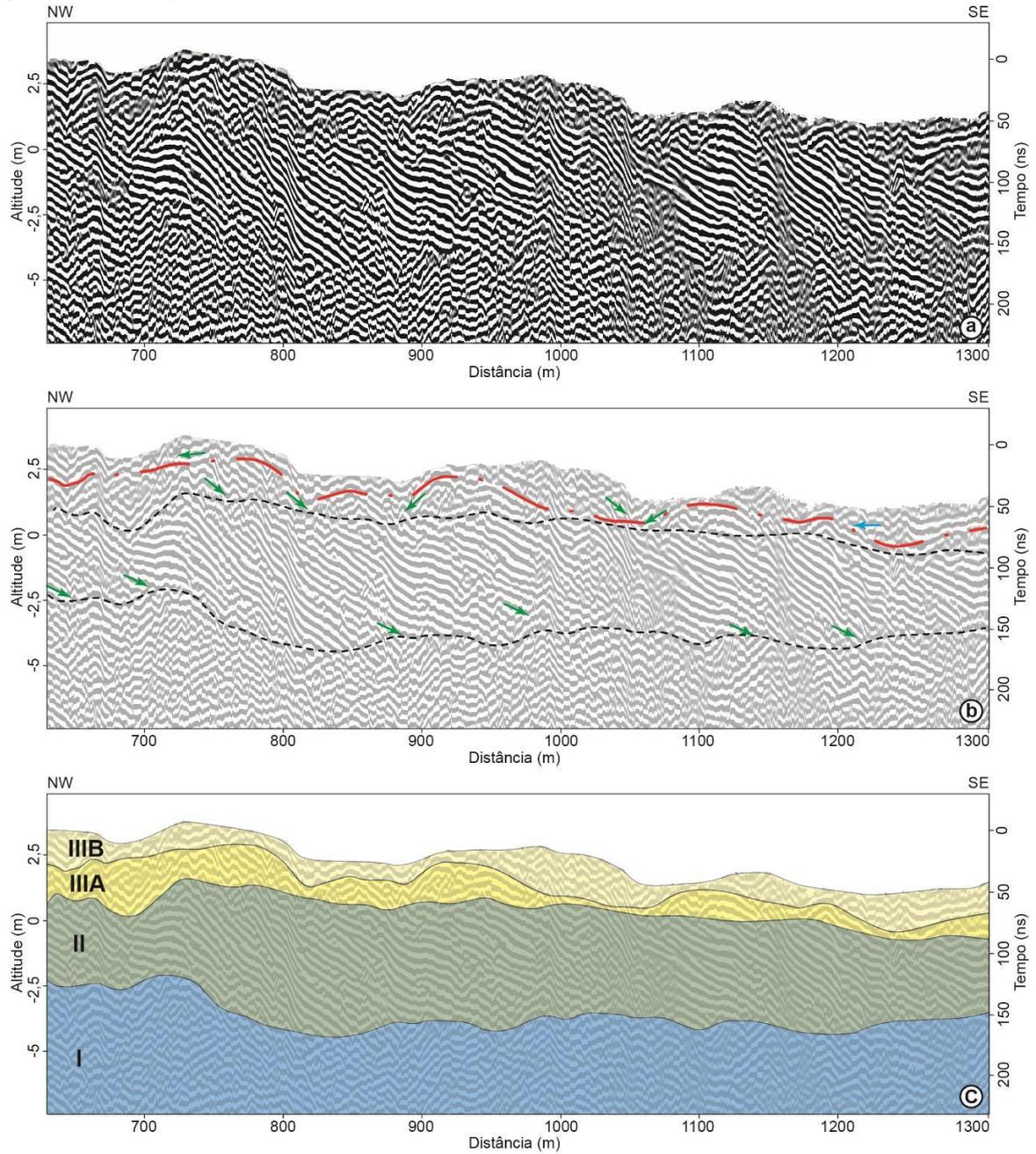
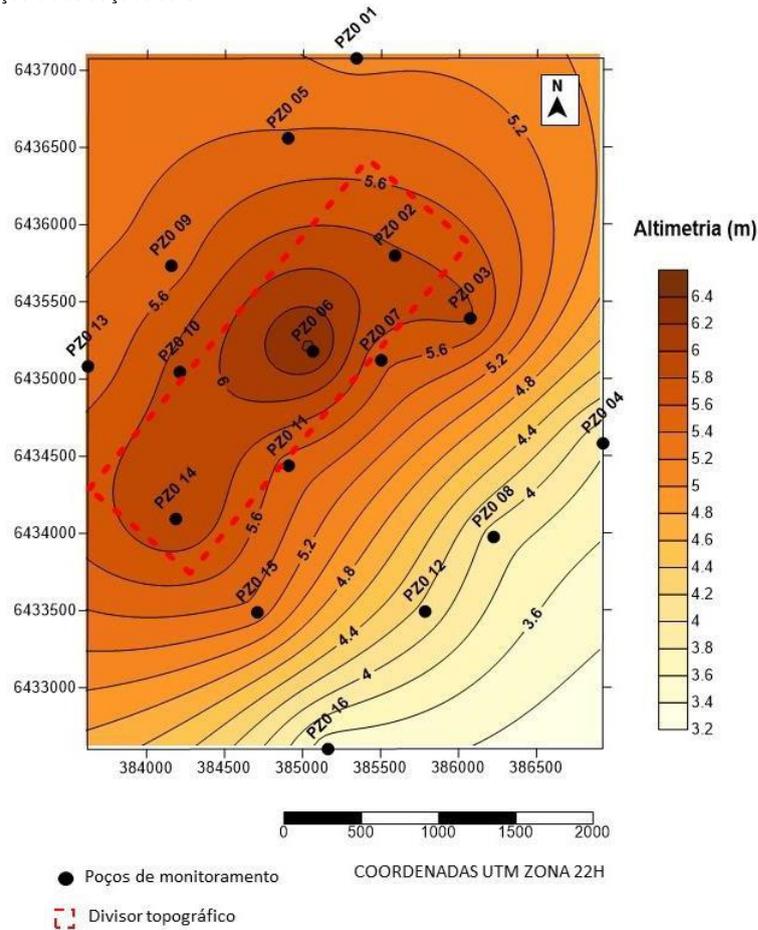


Figura 8 - Mapa topográfico obtido com base na integração dos dados das altitudes dos poços e das seções de GPR



O alto topográfico é uma condicionante geomorfológica que influencia diretamente nos sentidos de fluxo das águas do lençol freático e é melhor observada a partir da confecção dos mapas de fluxo apresentados no tópico 4.3.

4.2. Caracterização hidrogeológica da unidade eólica

Para a caracterização hidrogeológica dos depósitos eólicos foram utilizados os dados levantados através das sondagens e da rede de poços de monitoramento. A Tabela 1, Figuras 2 e 9 indicam a localização dos poços.

Tabela 1 - Localização e cotas dos poços de monitoramento

Poços	Coordenadas Geográficas – WGS 84		Altitudes (m)
	Latitude	Longitude	
PZO 01	32° 11'49.34"S	52° 12'59.31"O	5,131
PZO 02	32° 12'30.93"S	52° 12'50.39"O	5,818
PZO 03	32° 12'44.32"S	52° 12'32.12"O	5,852
PZO 04	32° 13'10.97"S	52° 11'59.93"O	3,848
PZO 05	32° 12'59.97"S	52° 13'16.26"O	5,413
PZO 06	32° 12'50.87"S	52° 13'10.71"O	6,451
PZO 07	32° 12'52.91"S	52° 12'54.01"O	5,659
PZO 08	32° 13'30.39"S	52° 12'26.93"O	3,934
PZO 09	32° 12'32.48"S	52° 13'45.15"O	5,481
PZO 10	32° 12'54.87"S	52° 13'43.35"O	5,862
PZO 11	32° 13'14.84"S	52° 13'16.95"O	5,541
PZO 12	32° 13'45.88"S	52° 12'43.90"O	4,167
PZO 13	32° 12'53.42"S	52° 14'5.83"O	5,441
PZO 14	32° 13'25.74"S	52° 13'44.68"O	6,004
PZO 15	32° 13'45.61"S	52° 13'24.97"O	5,348
PZO 16	32° 14'14.52"S	52° 13'8.01"O	3,485

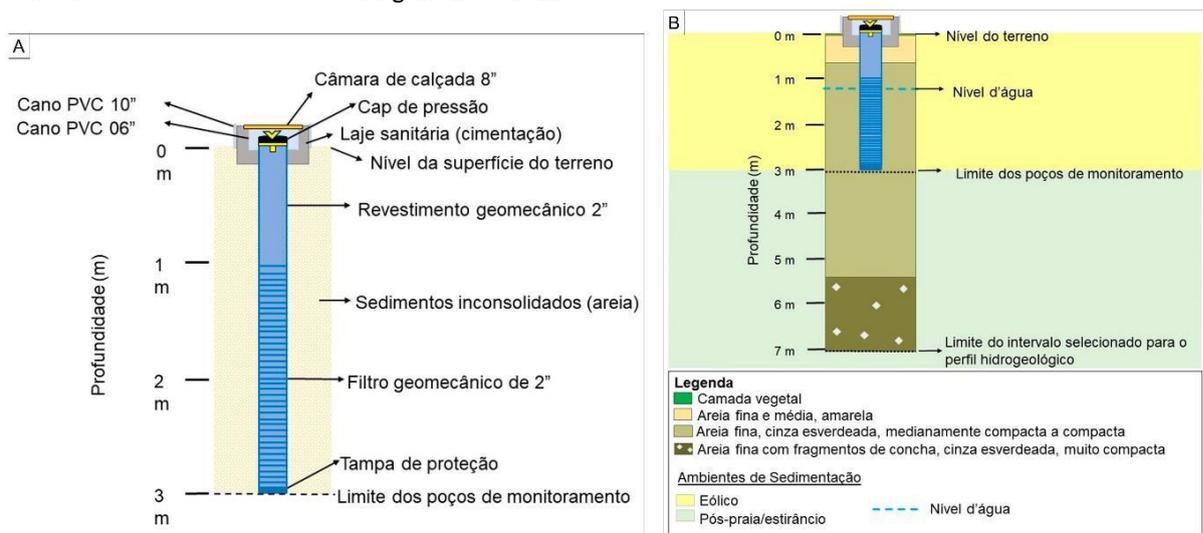
Figura 9 - Localização dos poços e do divisor topográfico presente na área de estudo (ESRI® Basemap)



A Figura 10A mostra um perfil construtivo de forma detalhada e adotado para todos os poços da área. Para a construção de um perfil hidrogeológico (Figura 10B) representativo para a área foi utilizado os dados da sondagem S14, cuja altitude é 5,73 m. Essa sondagem foi escolhida por estar localizada na

porção central da área de estudo e inserida geomorfologicamente no local onde ocorrem lençóis de areias transgressivos. Estes lençóis constituem parte dos depósitos presentes na unidade eólica. Para esse perfil foi utilizado o mesmo intervalo definido para as seções geológicas.

Figura 10 - Perfil construtivo e hidrogeológico dos poços. A) Perfil construtivo adotado para todos os poços; B) Perfil hidrogeológico e construtivo elaborado com base na sondagem S14 e Pzo 11



A unidade sedimentar é formada por areias de granulometria fina e média, com grau de compactidade que varia de pouco a medianamente compacta. Os níveis d'água (N.A.) dos poços estão localizados muito próximos à superfície do terreno e os dados levantados por meio do monitoramento de 11 meses estão apresentados na Tabela 2. O N.A. mais raso foi identificado no mês de junho, através

do poço 11 e apresentou o nível d'água em 0,07 m de profundidade, enquanto o N.A. mais profundo foi observado no mês de março, através do poço 06 com 1,87 m. Já a menor média de N.A. encontrada entre os poços foi no mês de agosto e a maior em março com valores de 0,293 e 1,323 m de profundidade, respectivamente.

Tabela 2 - Dados de N.A. entre os meses de outubro de 2010 e agosto de 2011

Poços	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Pzo 01	0,670	0,740	0,990	1,150	1,020	1,290	0,790	0,400	0,310	0,380	0,290
Pzo 02	1,000	1,010	1,210	1,350	1,130	1,330	0,890	0,180	0,180	0,270	0,190
Pzo 03	1,000	1,030	1,250	1,400	1,210	1,430	1,230	0,600	0,570	0,580	0,570
Pzo 04	0,890	0,930	1,250	1,300	1,180	1,330	0,810	0,440	0,430	0,440	0,400
Pzo 05	0,910	0,990	1,200	1,370	1,240	1,430	0,930	0,330	0,250	0,200	0,160
Pzo 06	1,290	1,300	1,610	1,800	1,720	1,870	1,390	0,830	0,730	0,790	0,740
Pzo 07	1,020	0,970	1,200	1,320	1,140	1,310	0,870	0,220	0,200	0,260	0,200
Pzo 08	0,790	0,970	1,160	1,260	1,100	1,240	0,830	0,420	0,360	0,550	0,300
Pzo 09	1,000	1,050	1,240	1,380	1,270	1,420	0,940	0,260	0,220	0,260	0,220
Pzo 10	0,790	0,890	1,160	1,320	1,220	1,340	0,840	0,230	0,200	0,440	0,210
Pzo 11	0,790	0,780	1,000	1,100	0,960	1,080	0,650	0,120	0,070	0,110	0,090
Pzo 12	1,100	0,800	1,290	1,380	1,240	1,370	0,940	0,570	0,490	0,590	0,450
Pzo 13	0,940	0,960	1,130	1,300	1,170	1,410	0,980	0,630	0,440	0,570	0,490
Pzo 14	0,890	0,910	1,080	1,190	1,000	1,160	0,740	0,260	0,130	0,300	0,170
Pzo 15	0,720	0,770	1,020	1,210	1,110	1,310	0,870	0,210	0,130	0,230	0,100
Pzo 16	0,700	0,610	0,850	0,940	0,730	0,840	0,450	0,130	0,110	0,130	0,100

Na Tabela 3 são apresentados os dados obtidos através do INMET para os acumulados mensais de precipitação pluviométrica para os 11 meses de monitoramento dos poços. Os maiores acumulados de precipitação ocorreram entre os meses de fevereiro e julho de 2011 com destaque para o mês

de março com 279 mm de precipitação. Os menores acumulados permaneceram entre os meses de outubro de 2010 e janeiro de 2011, com ênfase para outubro onde foi registrado apenas 9 mm para todo o mês.

Tabela 3 - Dados pluviométricos (INMET) para o município de Rio Grande

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Precipitação (mm/mês)	9	38	39	31	130	279	97	142	126	36	89

Na Tabela 4 são apresentadas as medições mensais dos níveis de água realizadas através dos 16 poços de monitoramento. A tabela apresenta a informação do menor e

do maior NA identificado na medição mensal, bem como a média mensal de todos os poços.

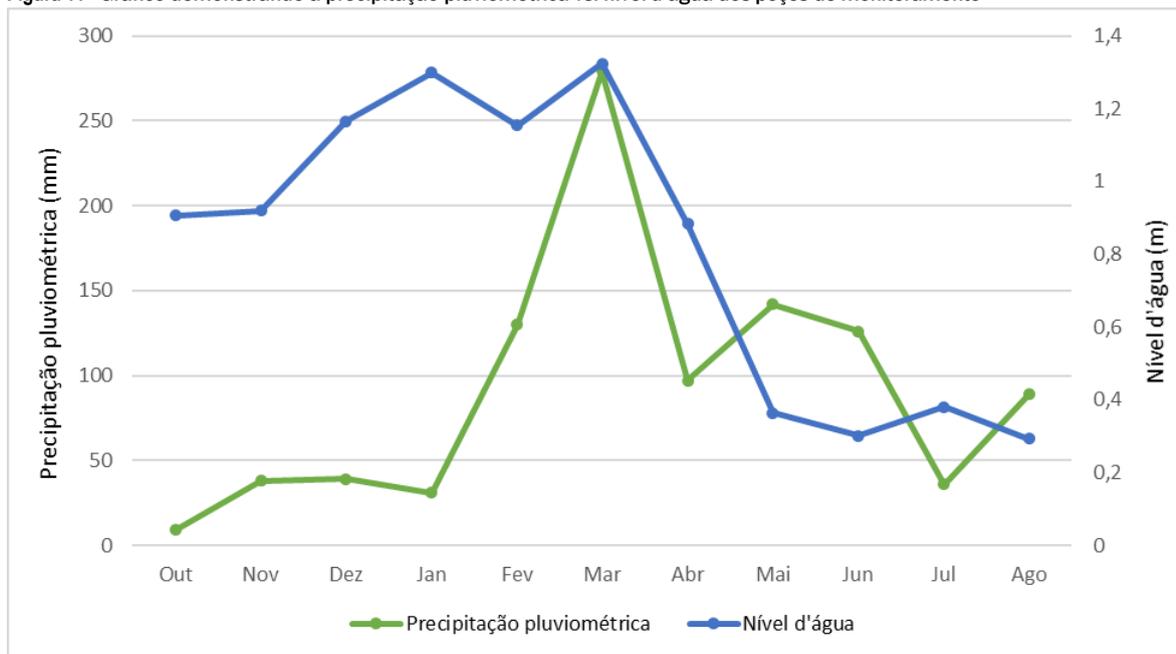
Tabela 4- Dados estatísticos dos níveis de água dos poços de monitoramento

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Média	0,906	0,919	1,165	1,298	1,153	1,323	0,884	0,364	0,301	0,381	0,293
Mínimo	0,670	0,610	0,850	0,940	0,730	0,840	0,450	0,120	0,070	0,110	0,090
Máximo	1,290	1,300	1,610	1,800	1,720	1,870	1,390	0,830	0,730	0,790	0,740

Na comparação entre os acumulados pluviométricos relacionados com as médias mensais dos níveis d'água (Figura 11), identificou-se que a partir de abril de 2011 os N.A. elevaram-se, diminuindo as médias mensais, principalmente para os meses de maio, junho, julho e agosto de 2011. Tal observação demonstra que a precipitação pluviométrica influenciou diretamente nas elevações dos níveis de água e a

estação do ano que corresponde ao inverno na região sul do Brasil, onde normalmente as temperaturas são mais baixas, retardou esse rebaixamento. Já a média mais alta foi encontrada em março de 2011, demonstrando que a menor recarga do aquífero coincide com a baixa precipitação e com a estação do ano com temperaturas mais altas, contribuindo para o rebaixamento do N.A.

Figura 11 - Gráfico demonstrando a precipitação pluviométrica vs. nível d'água dos poços de monitoramento



4.3. Avaliação do fluxo de água subterrânea na camada aquífera eólica.

cargas (Tabela 5) foram obtidas subtraindo-se as altitudes da boca de cada poço com o seu respectivo nível de água encontrado através do monitoramento mensal.

O sentido de fluxo da água subterrânea foi reconhecido a partir das diferenças das cargas hidráulicas do aquífero. Essas

Tabela 5 - Cargas hidráulicas obtidas entre os meses de outubro de 2010 e agosto de 2011

Poços	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Pzo 01	4,461	4,391	4,141	3,981	4,111	3,841	4,341	4,731	4,821	4,751	4,841
Pzo 02	4,818	4,808	4,608	4,468	4,688	4,488	4,928	5,638	5,638	5,548	5,628
Pzo 03	4,852	4,822	4,602	4,452	4,642	4,422	4,622	5,252	5,282	5,272	5,282
Pzo 04	2,958	2,918	2,598	2,548	2,668	2,518	3,038	3,408	3,418	3,408	3,448
Pzo 05	4,503	4,423	4,213	4,043	4,173	3,983	4,483	5,083	5,163	5,213	5,253
Pzo 06	5,161	5,151	4,841	4,651	4,731	4,581	5,061	5,621	5,721	5,661	5,711
Pzo 07	4,639	4,689	4,459	4,339	4,519	4,349	4,789	5,439	5,459	5,399	5,459
Pzo 08	3,144	2,964	2,774	2,674	2,834	2,694	3,104	3,514	3,574	3,384	3,634
Pzo 09	4,481	4,431	4,241	4,101	4,211	4,061	4,541	5,221	5,261	5,221	5,261
Pzo 10	5,072	4,972	4,702	4,542	4,642	4,522	5,022	5,632	5,662	5,422	5,652
Pzo 11	4,751	4,761	4,541	4,441	4,581	4,461	4,891	5,421	5,471	5,431	5,451
Pzo 12	3,067	3,367	2,877	2,787	2,927	2,797	3,227	3,597	3,677	3,577	3,717
Pzo 13	4,501	4,481	4,311	4,141	4,271	4,031	4,461	4,811	5,001	4,871	4,951
Pzo 14	5,114	5,094	4,924	4,814	5,004	4,844	5,264	5,744	5,874	5,704	5,834
Pzo 15	4,628	4,578	4,328	4,138	4,238	4,038	4,478	5,138	5,218	5,118	5,248
Pzo 16	2,785	2,875	2,635	2,545	2,755	2,645	3,035	3,355	3,375	3,355	3,385

Nos mapas potenciométricos apresentados na Figura 12 os fluxos encontrados apresentaram dois sentidos preferenciais: NW (sentido continente) e SE (sentido oceano). Além disso, pode-se identificar que os sentidos de fluxo se mantiveram os mesmos durante todo o período analisado, as únicas variações foram nos valores das cargas hidráulicas (Tabela 6) que aumentaram nos últimos 4 meses de monitoramento. Essa mudança resulta de uma combinação de fatores tais

como: elevada precipitação pluviométrica, acúmulo de precipitação de meses anteriores e de temperaturas mais baixas (inverno) fazendo com que a potencimetria seja maior devido ao aumento na recarga do aquífero, enquanto que em meses de menor precipitação e temperaturas mais altas (verão) as cargas diminuiram pela baixa taxa de recarga do aquífero bem como maior processo de evapotranspiração provocado pelo ocorrência de maiores temperaturas.

Figura 12 - Mapas de fluxo. A) Outubro de 2010; B) Agosto de 2011

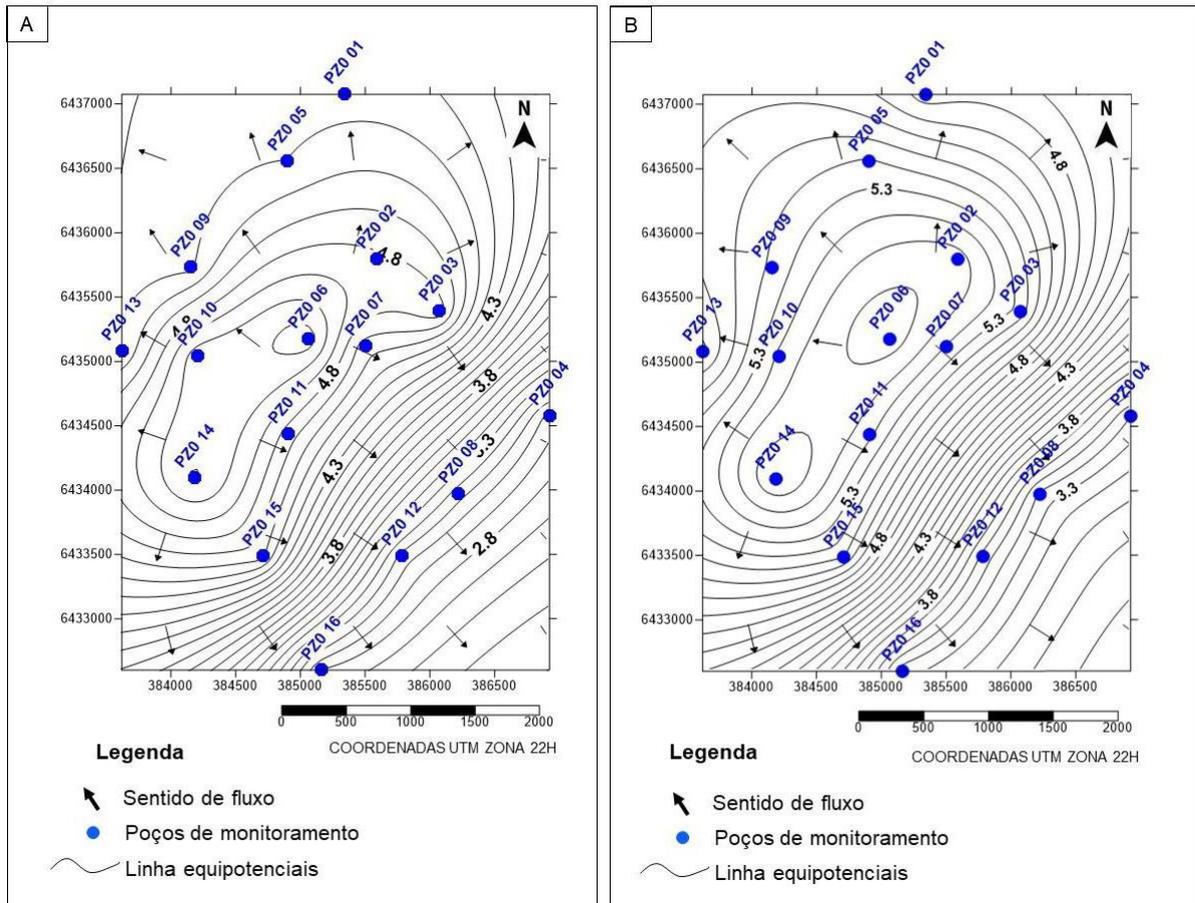


Tabela 6 - Dados estatísticos das cargas hidráulicas.

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Média	4,308	4,295	4,050	3,917	4,062	3,892	4,330	4,850	4,913	4,833	4,922
Mínimo	2,785	2,875	2,598	2,545	2,668	2,518	3,035	3,355	3,375	3,355	3,385
Máximo	5,161	5,151	4,924	4,814	5,004	4,844	5,264	5,744	5,874	5,704	5,834

A mudança de sentido do fluxo da água subterrânea coincide com o alto topográfico observado através do mapa altimétrico (Figura 8) e delimitado na Figura 9 mostrando assim que a topografia da área tem influência nas direções preferenciais de fluxo ao criar um divisor de águas. Essas elevações, além da área de estudo, podem ocorrer em outras regiões da Barreira IV e, por vezes, podem também estar relacionada a deposição do sistema eólico associado as diferentes fases de lençóis de areias transgressivos.

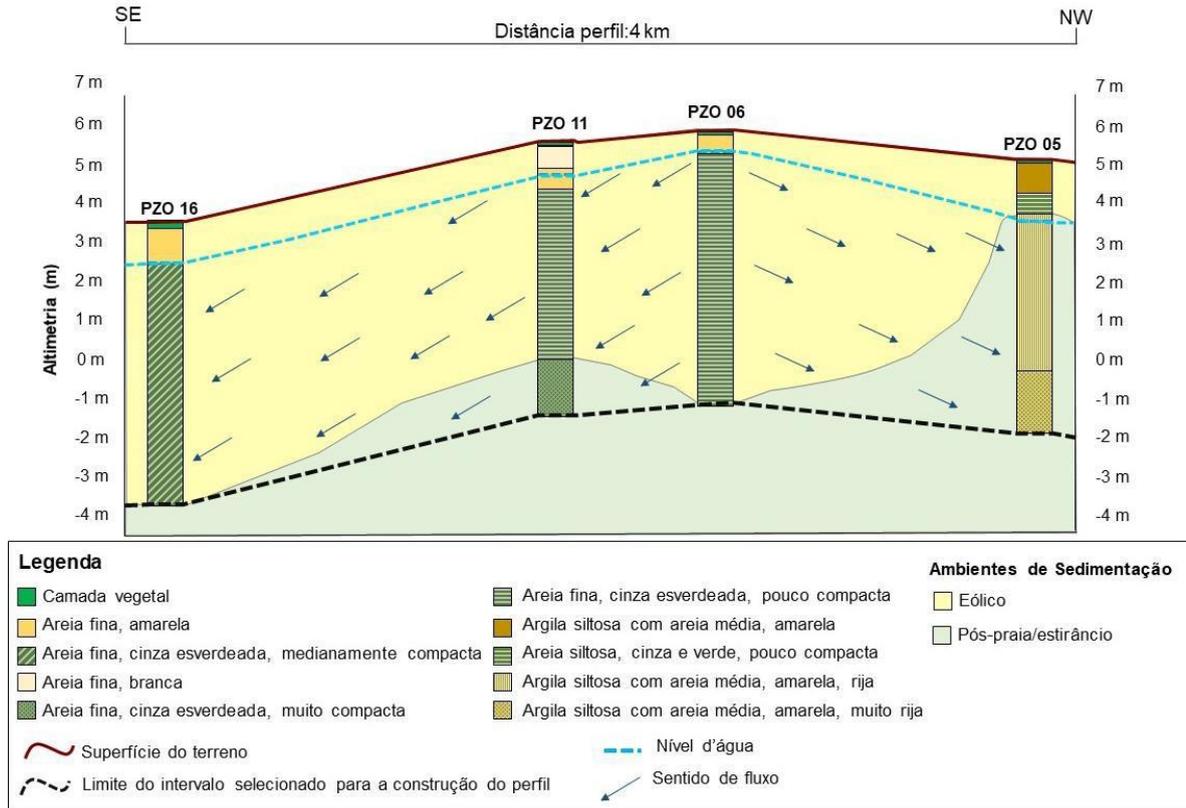
Salienta-se que a água possui capacidade de infiltração mais rápida e melhor percolação entre os sedimentos arenosos, devido à alta permeabilidade. Quando a água infiltra em camadas que possuem material de granulometria mais fina e que estão conseqüentemente mais compactadas, uma “barreira” é criada fazendo que o fluxo de água seja redirecionado para outros locais que apresentem maior porosidade e permeabilidade. Isso já foi observado no estudo realizado por Haitjema e Mitchell-Bruker (2005) que demonstraram que o controle de fluxo da superfície freática,

além da topografia, é condicionado pelas taxas de recarga, condutividade hidráulica, transmissividade e extensão do aquífero.

O perfil topográfico obtido com o DGPS permitiu observar que a morfologia do terreno mergulha suavemente no sentido do oceano. Na seção de GPR ajustada com a integração da topografia, verificam-se que os refletores possuem mergulho no mesmo sentido. Como as reflexões resultam de variações no arranjo deposicional que, por sua vez, influenciam o teor de água presente nos poros (Leandro et al., 2019), interpreta-se que essa geometria contribua para que o sentido de fluxo, naqueles 700 m de distância, ocorra em sentido ao mar.

Na Figura 13 é apresentado um perfil hidrogeológico conceitual que representa os sentidos preferenciais de fluxo da água subterrânea. Esse perfil possui 4 km de extensão partindo do oceano (SE) em direção ao continente (NW) e utiliza as cargas hidráulicas obtidas através dos poços (Pzo 16, Pzo 11, Pzo 06 e Pzo 05).

Figura 13 - Perfil hidrogeológico conceitual da área de estudo



5. CONCLUSÕES

A partir desse estudo foi possível identificar que o fluxo de água subterrânea na unidade eólica possui dois sentidos de fluxo preferenciais: NW (sentido continente) e SE (sentido oceano). Logo o movimento da água subterrânea em aquíferos costeiros que propicia uma circulação regional e preferencial do continente para o oceano pode ser alterado quando realizada uma análise em maior detalhe (local).

Nesse estudo foi verificado que o sentido de fluxo da água subterrânea é alterado nas porções mais elevadas do terreno demonstrando, dessa forma, que a topografia da área tem influência significativa nas mudanças do fluxo ao criar um divisor de águas.

Além disso a unidade eólica possui uma espessura de aproximadamente 3 m e é formada por areias de granulometria muito fina, fina e média, com grau de compactação que varia de pouca a medianamente compacta. A alternância dessas características texturais e geotécnicas também podem contribuir nas modificações de sentido do fluxo quando a água que percola facilmente entre os sedimentos de uma camada com alta permeabilidade encontra um obstáculo gerada por uma camada de mais baixa permeabilidade

A interpretação da seção de GPR integrada ao perfil topográfico obtido por DGPS, permitiu identificar que tanto a morfologia da superfície como as reflexões em subsuperfície mergulham suavemente no sentido do oceano, contribuindo

dessa forma para que o sentido de fluxo nesse intervalo interpretado ocorra para sudeste (SE). Partindo dessa constatação, sugere-se que novos trabalhos sejam realizados com interpretações de novos perfis geofísicos de GPR partindo-se do alto topográfico existente na porção central da área em direção ao continente. Essa nova análise poderia identificar se a morfologia da superfície e a geometria das camadas na porção com sentido de fluxo contrário ao oceano possuem inclinação concordante com o fluxo.

Portanto, concluiu-se que a topografia do terreno é um fator de influência no sentido de fluxo da água subterrânea, porém pressupõe-se que combinado a isso, fatores como: alterações de granulometria, grau de compactação dos sedimentos e geometria deposicional das camadas também possam estar associados e contribuir no sentido de fluxo de água subterrânea para a unidade eólica presente na área de estudo.

REFERÊNCIAS

- ARCGIS Online. [S. l.], 2022c. Disponível em: <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html>. Acesso em: 11 nov. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7250*: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 6484*: Solo: Sondagens de simples reconhecimento com SPT: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

- BARBOZA, E. G.; ROSA M. L. C. C.; CARON, F. Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emersa da Bacia de Pelotas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 6., 2014, Porto Alegre. *Resumos expandidos* [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2014. p. 1-6.
- BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J. Erosional features of the eastern margin of the Patos Lagoon, southern Brazil: significance for Holocene history. *Journal of Coastal Research*, SI 35, p. 260–264, 2003.
- BARBOZA, E. G.; DILLENBURG, S. R.; RITTER, M. N.; ANGULO, R. J.; BIANCINI DA SILVA, A.; ROSA, M. L. C. C.; CARON, F.; SOUZA, M. C. Holocene Sea-Level Changes in Southern Brazil Based on High-Resolution Radar Stratigraphy. *Geosciences (Switzerland)*, v. 11, n. 8, p. 326, 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080326>
- BARLOW, PAUL M, 2003. Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast - *Circular 1262*, p. 1-121. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/circ/2003/circ1262/pdf/circ1262.pdf> Acesso em: 08 mar. 2023.
- CAVALCANTI, G. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Aplicação de indicadores para águas subterrâneas como alerta para o estado atual de exploração dos aquíferos intersticiais da região metropolitana do Recife – PE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. *Anais* [...]. Campo Grande: ABRHidro, 2009. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=10565>. Acesso em: 18 mar. 2023.
- CHANDRAJITH, R. et al. Quantification of groundwater–seawater interaction in a coastal sandy aquifer system: a study from Panama, Sri Lanka. *Environmental Earth Sciences*, [s. l.], v. 72, n. 3, p. 867–877, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-3010-y#citeas>. Acesso em: 2 jun. 2022
- CHAVES, S. C. S. et al. Caracterização hidroquímica de águas subterrâneas da Região Metropolitana do Recife – PE. *Diversitas Journal*, Maceió, v. 7, n. 4, p. 2391-2398, 2022. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/2106. Acesso em: 18 mar. 2023. <https://doi.org/10.48017/dj.v7i4.2106>
- CLEROT, L. C. P. *Estudo da barreira IV na região do Cassino, Rio Grande – RS: evolução e caracterização como reservatório*. 2004. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- CLEROT, L. C. P. et al. Estudo da barreira IV na região do Cassino, Rio Grande, RS: evolução e caracterização como reservatório. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2003, Porto Alegre. *Resumos* []. Porto Alegre: UFRGS, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/40184>. Acesso em: 4 jul. 2020.
- DANIELS, J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, v. 33, p. 195-207, 1995. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90041-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90041-1)
- DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G. The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. In: MARTINI, I. P.; WANLESS, H. R. (ed.). *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. London: Geological Society, Special Publications 388, 2014. p. 333–352. <https://doi.org/10.1144/SP388.16>
- DILLENBURG, S. R. et al. The complex prograded Cassino barrier in southern Brazil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7–6 ka. *Marine Geology*, [s. l.], v. 390, p. 106-119, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.06.007>
- DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; HESP, P.A.; ROSA, M.L.C.C. Ground Penetrating Radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. SI 64, p. 651-655, 2011.
- FOLK, R.L., WARD, W.C., 1957. Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 27, p.3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>.
- HAITJEMA, H. M.; MITCHELL-BRUKER, S. Are water tables a subdued replica of the topography? *Groundwater*, [s. l.], v. 43, n. 6, p. 781–786, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x>. Acesso em: 1 set. 2022.
- HAUSMAN A. Províncias hidrogeológicas do estado do Rio Grande do Sul - RS. *Acta Geológica Leopoldensia: Estudos Tecnológicos*, [s. l.], n. 2, p. 1-27, 1995.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Mapa de estações, 2013. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- LEANDRO, C. G. et al. GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 162, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092698511830065X?via%3DIhub>. Acesso em: 11 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.01.002>
- MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. *Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final*. Porto Alegre: CPRM, 2005. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/5249>. Acesso em: 2 dez. 2020.
- MANOEL FILHO, J. Água Subterrânea em Meios Porosos Homogêneos: Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.
- MITCHUM JR., R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic stratigraphy & global changes of sea level: Part six: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON, C. E. (org.). *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. p. 117-123.
- NASCIMENTO, E. A. *Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera barreira holocênica na região de Cassino, Rio Grande (RS)*. 2013. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/95520>. Acesso em: 01 dez. 2020.
- NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, [s. l.], v. 66, n. 3–4, p. 261-330, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825204000054>. Acesso em: 9 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- OLIVEIRA, A. M. et al. Análise do avanço da cunha salina em sistema aquífero costeiro. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s. l.], v. 23, n. 5, p. 939-950, set./out. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/B5DS46h345P9xBryJTmcxZR/?lang=pt>. Acesso em: 18 mar. 2023. set./out. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/B5DS46h345P9xBryJTmcxZR/?lang=pt>. Acesso em: 18 mar. 2023. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018167251>
- ROCHA, C. M. *Conexões e interações entre a água superficial e subterrânea na Costa Norte do RS (CNRS), Brasil*. 2018. 132 f. Tese (Doutorado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018. Disponível

em: <https://repositorio.furg.br/handle/1/10312>. Acesso em: 4 mai. 2020.

ROCHA, C. M.; ANDRADE, C. F. F.; NIENCHESKI, L. F. H. Descarga de água subterrânea para as lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 76-84, 2015. Disponível em: <https://periodicos.univali.br/index.php/bjast/article/view/6194>. Acesso em: 4 mai. 2020. <https://doi.org/10.14210/bjast.v19n2.6194>

ROCHA, C. M.; BARBOZA, E. G.; NIENCHESKI, L. F. H. Radon activity and submarine groundwater discharge in different geological regions of a coastal barrier in Southern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, [s. l.], v. 77, n. 14, p. 1-14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7711-0>. Acesso em: 5 maio 2020. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7711-0>

TEDESCO, A. M.; OLIVEIRA, G. A.; TROJAN, F. Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 401-407, maio/jun. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/XnLJNmdCCTdVpNJT8KzMGQK/?lang=pt>. Acesso em: 18 mar. 2023. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190322>

TROIAN, G. C. et al. Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande Do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 264-274, 2020. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29883>. Acesso em: 18 mar. 2023. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i3.29883>

VAIL P. R.; MITCHUM JR., R. M.; THOMPSON III, S. Seismic stratigraphy & global changes of sea level: Part three: relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C. E. (org.). *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. p. 63-81.

VILLWOCK, J. A. et al. Geology of the Rio Grande do Sul coastal province. In: RABASSA, J. (ed.). *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. Londres: CRC Press, 1986. p. 79-97.

ARCGIS Online. [S. l.], 2022c. Disponível em: <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html>. Acesso em: 11 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7250: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solos*. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 6484: Solo: Sondagens de simples reconhecimento com SPT: Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

BARBOZA, E. G.; ROSA M. L. C. C.; CARON, F. Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emersa da Bacia de Pelotas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 6., 2014, Porto Alegre. *Resumos expandidos* [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2014. p. 1-6.

BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J. Erosional features of the eastern margin of the Patos Lagoon, southern Brazil: significance for Holocene history. *Journal of Coastal Research*, SI 35, 260-264, 2003.

BARBOZA, E. G.; DILLENBURG, S. R.; RITTER, M. N.; ANGULO, R. J.; BIANCINI DA SILVA, A.; ROSA, M. L. C. C.; CARON, F.; SOUZA, M. C.

Holocene Sea-Level Changes in Southern Brazil Based on High-Resolution Radar Stratigraphy. *Geosciences (Switzerland)*, v. 11, n. 8, 326, 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080326>

BARLOW, PAUL M. *Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast - Circular 1262*, p. 1-121, 2003. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/circ/2003/circ1262/pdf/circ1262.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2023.

CAVALCANTI, G. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Aplicação de indicadores para águas subterrâneas como alerta para o estado atual de exploração dos aquíferos intersticiais da região metropolitana do Recife - PE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. *Anais* [...]. Campo Grande: ABRHidro, 2009. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=10565>. Acesso em: 18 mar. 2023.

CHANDRAJITH, R. et al. Quantification of groundwater-seawater interaction in a coastal sandy aquifer system: a study from Panama, Sri Lanka. *Environmental Earth Sciences*, [s. l.], v. 72, n. 3, p. 867-877, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-3010-y#citeas>. Acesso em: 2 jun. 2022

CHAVES, S. C. S. et al. Caracterização hidroquímica de águas subterrâneas da Região Metropolitana do Recife - PE. *Diversitas Journal*, Maceió, v. 7, n. 4, p. 2391-2398, 2022. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/2106. Acesso em: 18 mar. 2023. <https://doi.org/10.48017/dj.v7i4.2106>

CLEROT, L. C. P. *Estudo da barreira IV na região do Cassino, Rio Grande - RS: evolução e caracterização como reservatório*. 2004. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CLEROT, L. C. P. et al. *Estudo da barreira IV na região do Cassino, Rio Grande, RS: evolução e caracterização como reservatório*. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2003, Porto Alegre. *Resumos* [...]. Porto Alegre: UFRGS, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/40184>. Acesso em: 4 jul. 2020.

DANIELS, J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, v. 33, p. 195-207, 1995. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90041-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90041-1)

DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G. The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. In: MARTINI, I. P.; WANLESS, H. R. (ed.). *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. London: Geological Society, Special Publications 388, 2014. p. 333-352. <https://doi.org/10.1144/SP388.16>

DILLENBURG, S. R. et al. The complex prograded Cassino barrier in southern Brazil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7-6 ka. *Marine Geology*, [s. l.], v. 390, p. 106-119, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.06.007>

DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; HESP, P.A.; ROSA, M.L.C.C. Ground Penetrating Radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. SI 64, p. 651-655, 2011.

FOLK, R.L., WARD, W.C., 1957. Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters. *Journal of Sedimentary*

Petrology 27, 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>

HAITJEMA, H. M.; MITCHELL-BRUKER, S. Are water tables a subdued replica of the topography? *Groundwater*, [s. l.], v. 43, n. 6, p. 781-786, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x>

HAUSMAN A. Províncias hidrogeológicas do estado do Rio Grande do Sul - RS. *Acta Geológica Leopoldensia: Estudos Tecnológicos*, [s. l.], n. 2, p. 1-27, 1995.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Mapa de estações*, 2013. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 21 jul. 2020.

LEANDRO, C. G. et al. GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 162, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092698511830065X?via%3Dihub>. Acesso em: 11 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.01.002>

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. *Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul*: relatório final. Porto Alegre: CPRM, 2005. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/5249>. Acesso em: 2 dez. 2020.

MANOEL FILHO, J. Água Subterrânea em Meios Porosos Homogêneos: Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

MITCHUM JR., R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic stratigraphy & global changes of sea level: Part six: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON, C. E. (org.). *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. p. 117-123.

NASCIMENTO, E. A. *Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera barreira holocênica na região de Cassino, Rio Grande (RS)*. 2013. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/95520>. Acesso em: 01 dez. 2020.

NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, [s. l.], v. 66, n. 3-4, p. 261-330, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825204000054>. Acesso em: 9 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>

OLIVEIRA, A. M. et al. Análise do avanço da cunha salina em sistema aquífero costeiro. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s. l.], v. 23, n. 5, p. 939-950, set./out. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/B5DS46h345P9xBryJTmcxZR/?lang=pt>. Acesso em: 18 mar. 2023. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018167251>

ROCHA, C. M. *Conexões e interações entre a água superficial e subterrânea na Costa Norte do RS (CNRS), Brasil*. 2018. 132 f. Tese (Doutorado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/handle/1/10312>. Acesso em: 4 mai. 2020.

ROCHA, C. M.; ANDRADE, C. F. F.; NIENCHESKI, L. F. H. Descarga de água subterrânea para as lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 76-84, 2015. Disponível em: <https://periodicos.univali.br/index.php/bjast/article/view/6194>. Acesso em: 4 mai. 2020. <https://doi.org/10.14210/bjast.v19n2.6194>

ROCHA, C. M.; BARBOZA, E. G.; NIENCHESKI, L. F. H. Radon activity and submarine groundwater discharge in different geological regions of a coastal barrier in Southern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, [s. l.], v. 77, n. 14, p. 1-14, 2018.. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7711-0>

TEDESCO, A. M.; OLIVEIRA, G. A.; TROJAN, F. Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 401-407, maio/jun. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/XnLJNmdCCTdVpNJT8KzMGQK/?lang=pt>. Acesso em: 18 mar. 2023. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190322>

TROJAN, G. C. et al. Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande Do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 264-274, 2020. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/view/29883>. Acesso em: 18 mar. 2023. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i3.29883>

VAIL P. R.; MITCHUM JR., R. M.; THOMPSON III, S. Seismic stratigraphy & global changes of sea level: Part three: relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C. E. (org.). *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. p. 63-81.

VILLWOCK, J. A. et al. Geology of the Rio Grande do Sul coastal province. In: RABASSA, J. (ed.). *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. Londres: CRC Press, 1986. p. 79-97. <https://doi.org/10.1201/9781003079316-5>